

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Měření tlakové ztráty a určení odporového
součinitele sítky filtru**

Measuring of the Pressure Drop and Loss Coefficient
Determination of the Filter Screen

Student:

Jakub Charvát

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Charvát**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Měření tlakové ztráty a určení odporového součinitele sítky filtru**
Measuring of the Pressure Drop and Loss Coefficient Determination of the Filter Screen
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište daný problém a cíl úlohy.
2. Zpracujte teoretický základ k tématu hydraulických odporů v potrubí.
3. Navrhněte a realizujte úpravu vodní tratě pro měření tlakové ztráty na sítku filtru.
4. Popište metodiku měření a použité měřidla.
5. Proveďte měření pro vybraná sítky a zadané podmínky.
6. Zpracujte vyhodnocení výsledků formou grafů a tabulek.

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*, VŠB-TU Ostrava, 2007, 260 s. Dostupné na <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta. VŠB-TU Ostrava, 1995, 152 s. Návodů pro laboratorní měření dostupné na <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
VINOPAL, S., KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. SNTL Praha, 1963, 650 s.
BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2, část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online]. Dostupné z <http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>.
Firemní literatura.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě
21.5.2018

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2018


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jakub Charvát

Adresa trvalého pobytu autora práce: Oskava 69, 788 01 Oskava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

CHARVÁT, J. *Měření tlakové ztráty a určení odporového součinitele sítky filtru: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2018, 53 s. Vedoucí práce: Drábková, S.

Bakalářská práce se zabývá hydraulickými ztrátami v potrubí. Konkrétně měřením tlakové ztráty a určení odporového součinitele sítky filtru. Tento prvek slouží k výrobě filtračních vložek filtrů. Pro naměření dat bylo nutné zrealizovat vodní trať, do které se zakomponoval vzorek sítky filtru. Zaznamenávala se tlaková difference na zkoumaném prvku a rychlost proudění kapaliny v potrubí. Naměřená data byla zanesena do tabulek. Dále byla data vyhodnocena v programu Excel a vynesena do grafů pro následné porovnání.

Klíčová slova: ztráty, potrubí, vodní trať, sítky, filtr, difference, tlak, průtok

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

CHARVÁT, J. *Measuring of the Pressure Drop and Loss Coefficient Determination of the Filter Screen: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydraulic and Pneumatic Machines and Equipment, 2018, 53 p. Thesis head: Drábková, S.

Bachelor thesis deals with hydraulic losses in pipes. Specifically, with measuring of the pressure drop and loss coefficient determination of the filter screen. This element is used to produce filter cartridge inserts. To measure the data, it was necessary to build a water track, which contained samples of filter sieves. The pressure difference on the element examined and the flow velocity of the fluid in the pipeline were recorded. The measured data were entered into the tables. Additionally, the data were evaluated in Excel and processed into graphs for subsequent comparison.

Keywords: losses, pipeline, water track, strainer, filter, differential, pressure, flow

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala.

Obsah

Úvod	11
Seznam použitých symbolů a značek	10
1 Cíl bakalářské práce	12
2 Hydraulické odpory v potrubí	13
2.1 Třecí odpory (ztráty) v potrubí.....	14
2.1.1 Laminární proudění.....	15
2.1.2 Turbulentní proudění	16
2.2 Místní odpory (ztráty)	18
3 Návrh a realizace vodní tratě pro měření.....	20
3.1 Návrh vodní tratě v laboratoři E 306.....	20
3.2 Specifikace komponent v laboratoři E306	22
3.3 Vodní trať v laboratoři N108	23
3.4 Specifikace komponent laboratoři N108.....	24
4 Metody měření tlaku a průtoku.....	26
4.1 Měření tlaku	26
4.2 Měření rychlosti a průtoku	27
4.3 Použitá měřicí technika pro určení tlakové ztráty a průtoku na měřicí trati	29
5 Postup měření pro vybraná sítká a zadané podmínky	30
5.1 Umístění vzorků do obvodu	30
5.2 Zkušební vzorky.....	31
5.3 Postup měření.....	36
5.4 Naměřená data.....	36
6 Vyhodnocení výsledků	38
6.1 Příklad výpočtu	38
6.2 Vyhodnocení dat sítká S1	39
6.3 Vyhodnocení dat sítká S2.....	42

6.4	Vyhodnocení dat sítka S3.....	44
6.5	Vyhodnocení dat sítka S4.....	46
6.6	Porovnání síték.....	48
7	Závěr.....	51
	Seznam použité literatury	52

Seznam použitých symbolů a značek

Značka	Název značky	Jednotka
d	průměr potrubí	[m]
dd	průměr drátu	[mm]
do	velikost otvoru	[mm]
e_z	ztrátová energie	[J·kg ⁻¹]
g	gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
h	výška	[m]
h_z	ztrátová výška	[m]
k	absolutní střední hodnotu drsnost	[1]
k_r	obrácená hodnota relativní drsnosti	[1]
l	délka potrubí	[m]
l_e	ekvivalentní délka	[m]
p	tlak	[Pa]
p_z	ztrátový tlak	[Pa]
Q_v	objemový průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	průtočná plocha	[m ²]
v	rychlost proudění	[m·s ⁻¹]
ε	relativní drsnosti	[1]
ζ	součinitel místní ztráty	[1]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
λ	součinitel tření	[1]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	měrná hmotnost	[m ³ ·kg ⁻¹]

Úvod

Měření tlakové ztráty a zjišťování odporového součinitele místních ztrát je v hydraulice nezbytně nutné pro navrhování a dimenzování hydraulických systémů. Bakalářská práce se věnuje měřením tlakové ztráty a určení odporového součinitele sítky filtru. Tyto vzorky síték byly dodány firmou ARMATURY Group a.s. Z těchto síték se následně vyrábějí filtrační vložky do filtrů. V teoretické části bakalářské práce jsou popsány hydraulické odpory v potrubí. Jedná se o třecí ztráty při laminárním a turbulentním proudění a místní ztráty. Pro zjištění místních odporů je potřeba určit tlakovou diferenci a zároveň rychlost proudění tekutiny, proto jsou v bakalářské práci popsány metody a použita zařízení při měření.

V praktické části bakalářské práce je popsána realizace vodní tratě pro měření tlakové ztráty na sítku filtru, včetně komponent tratě a měřicích zařízení. Dále je popsán postup měření místní ztráty na vzorcích sítky. Zkušební vzorky jsou popsány a vyobrazeny na obrázcích včetně fotografií detailů z digitálního mikroskopu. Odečtená data z měření jsou zanesena do tabulek a následně jsou hodnoty použity pro vyhodnocení místních ztrát, které jsou graficky vyjádřeny součinitelem místní ztráty v závislosti na Reynoldsově čísle a tlakovou ztrátou v závislosti na průtoku. Tyto závislosti jsou vzájemně graficky porovnány pro jednotlivá sítky a v závěru je provedeno zhodnocení úlohy.

1 Cíl bakalářské práce

Cílem bakalářské práce je stanovení tlakové ztráty a určení odporového součinitele sítky filtru pro různé hodnoty průtoku ve vodní trati. Vyhodnocení místních ztrát je provedeno graficky pomocí součinitele místní ztráty v závislosti na Reynoldsově číslu a tlakové ztráty v závislosti na průtoku.

Vzorky filtračních sítěk jsou dodány firmou ARMATURY Group a.s. Tato sítky slouží k následné výrobě filtračních vložek filtrů. Filtry, respektive filtrační sítky, způsobují v hydraulickém vedení místní ztráty. S těmito ztrátami je nutné počítat při návrhu každého hydraulického systému.

Body vedoucí k cíli práce:

- Zpracování teoretického základu hydraulických odporů v potrubí
- Návrh a realizace vodní tratě pro změření místní ztráty na vzorku sítky filtru
- Metody měření místních ztrát a použitá měřidla
- Měření vzorků sítěk při zadaných podmínkách
- Zpracování naměřených dat a vyhodnocení výsledků

2 Hydraulické odpory v potrubí

Hydraulický odpor, nebo také hydraulická ztráta v potrubí, vzniká při proudění reálné tekutiny. Jeho příčinou je vazké tření v důsledku viskozity, případně drsnost stěny průtočného průřezu, například při proudění přímo potrubím nebo korytem. Dále také vzniká při průtoku kapaliny různými místy v potrubním systému, způsobující změny proudění, změny průřezu (rozšíření nebo zúžení), změnu směru, škrcením, filtrací, chladiči a podobně. V těchto místech se mění rychlost i směr proudění a tato změna vyvolává rozptyl energie, který se projevuje hydraulickou ztrátou.¹

Výpočty hydraulických systémů mají základ v aplikaci rovnice kontinuity neboli spojitosti, která představuje zákon zachování hmotnosti, a pro jednorozměrné ustálené proudění je ve tvaru (1):

$$Q_v = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{konst.} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Zákon zachování mechanické energie je definován Bernoulliho rovnicí, vyjadřující rovnováhu energií v průběhu proudění skutečných kapalin. V této rovnici je nutné určit hydraulické ztráty, které jsou označeny jako ztrátová energie e_z a zahrnují ztráty třením i místní. Rovnice obsahuje tedy tlakovou, kinetickou, potenciální a ztrátovou energii a její tvar pro dva různé průřezy uvádí (2):¹

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + e_z \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

Při vynuceném proudění se ztráta projevuje jako úbytek tlaku, pokud například kapalina vytéká z nádoby, projeví se ztrátou kinetické energie, při proudění kapaliny gravitačním potrubím nebo korytem dochází ke snížení potenciální energie.¹

Rozptýlenou neboli také ztrátovou energii e_z můžeme vyjádřit ve formě každého členu Bernoulliho rovnice (3):¹

$$e_z = Y_z = \frac{p_z}{\rho} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} = g \cdot h_z \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3)$$

kde p_z je tlaková ztráta

ζ je ztrátový součinitel

h_z je ztrátová výška

Z uvedených vztahů vyplývají rovnice pro výpočet tlakové ztráty p_z a ztrátové výšky h_z vztahy (4) a (5):¹

$$p_z = \rho \cdot e_z = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{v^2}{2} = \rho \cdot g \cdot h_z \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$

$$h_z = \frac{e_z}{g} = \frac{p_z}{\rho \cdot g} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

Hydraulické odpory v potrubí podle fyzikální podstaty rozdělit na dva rozdílné druhy:

- **Třecí odpory** - vznikají díky drsnosti potrubí a vazkostí kapaliny, vliv na tyto odpory mají délka potrubí nebo kanálu, průměr potrubí a režim proudění kapaliny.³
- **Místní odpory** – vznikají v částech hydraulického systému, kde díky změně směru a velikosti proudění způsobené změnou průřezu, směru, škrcením, filtrací apod. dojde k odtržení proudu a zavírání prouděné kapaliny.³

2.1 Třecí odpory (ztráty) v potrubí

Při proudění skutečné kapaliny dochází ke ztrátě kinetické energie v důsledku tření částic o povrch průtočného potrubí a v důsledku vazkosti kapaliny. Tuto ztrátu v potrubí označujeme jako třecí odpory v potrubí. Aby kapalina protekla potrubím stejnou rychlostí, tudíž aby rychlost v prvním a druhém místě potrubí byla stejná, musí být kinetická energie získána z poklesu tlaku. Tento pokles tlaku nazýváme jako tlaková ztráta na potrubí p_z .¹

Třecí odpory závisí na několika faktorech. Jedním z parametrů, které mají vliv na třecí odpory, je délka potrubí l . Se zvětšující se délkou potrubí třecí odpor přímo úměrně narůstá. Dále je třecí odpor ovlivněn režimem proudění. Tento režim proudění vyjadřuje bezrozměrné Reynoldsovo číslo Re (6), které ovlivňuje přímo úměrně střední rychlost v_s proudění a charakteristický rozměr průtočného kanálu, v případě potrubí jeho průměr d .

Zároveň je Reynoldsovo číslo nepřímo úměrně závislé na viskozitě kapaliny ν , která vyjadřuje tření a tečná napětí dvou vrstev o rozdílné rychlosti.²

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad [1] \quad (6)$$

Výpočtem Reynoldsova čísla můžeme předem určit, o jaké proudění se bude jednat. Rozlišujeme dva základní druhy proudění. Laminární proudění vody nastává v uzavřených profilech potrubí do hodnoty $Re \leq 2320$. Pokud je Reynoldsovo číslo větší, můžeme uvažovat, že nastal režim turbulentního proudění. Případně můžeme rozlišit režim přechodu, kdy zatím není turbulentní proudění plně rozvinuto.²

2.1.1 Laminární proudění

Laminární proudění nastává při proudění skutečné kapaliny při nižších rychlostech. V průběhu proudění se částice tekutiny pohybují po rovnoběžných proudnicích a vzájemně se nemísí. Při výpočtu tlakové ztráty p_z (7) v potrubí kruhového průřezu vycházíme ze známého vztahu pro Poiseuilleovo proudění (8):¹

$$Q_v = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot v = \frac{\pi}{128 \cdot \eta} \cdot \frac{p_z}{l} \cdot d^4 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

Z toho vyplývá pro tlakovou ztrátu:

$$p_z = \frac{32 \cdot \eta \cdot l \cdot v}{d^2} = \frac{32 \cdot \eta \cdot l \cdot v}{d^2} \cdot \frac{v}{v} \cdot \frac{\rho}{\rho} \cdot \frac{2}{2} = \frac{64}{\frac{v \cdot d}{\nu}} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho$$

$$p_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

Z výše uvedeného vztahu vyplývá pro součinitel tření λ (9): ²

$$\lambda = \frac{64}{\frac{v \cdot d}{\nu}} = \frac{64}{Re} \quad [1] \quad (9)$$

Ztrátovou výšku h_z lze vypočítat pomocí Darcy-Weisbachova vztahu (10): ²

$$h_z = \frac{p_z}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

Pokud známe třecí součinitel, délku a průměr potrubí můžeme jej převést na ztrátový součinitel (11): ²

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad [1] \quad (11)$$

2.1.2 Turbulentní proudění

V režimu turbulentního proudění se trajektorie částic kapaliny navzájem kříží, dochází k pohybu částic napříč průřezem. Zvyšuje se tečné napětí, kromě laminárního smykového napětí v blízkosti stěny se s rostoucím Re uplatňuje vliv turbulentního smykového napětí, proto jsou v tomto režimu i větší ztráty ve srovnání s laminárním prouděním. Při turbulentním prouděním je třecí součinitel λ závislý nejen na Reynoldsově číslu Re , ale i na relativní drsnosti potrubí ε (12). Případně na obrácené hodnotě k_r (13), kde k vyjadřující absolutní střední hodnotu drsnosti stěny v potrubí. ¹

$$\varepsilon = \frac{d}{k} \quad [1] \quad (12)$$

$$k_r = \frac{k}{d} \quad [1] \quad (13)$$

Vznik hydraulických odporů v potrubí důsledkem turbulentního proudění je komplikovaný jev, který dosud není možné exaktně vyřešit. Vztahy používané pro výpočet součinitele odporu jsou stanoveny z experimentálních měření.³

Pokud uvažujeme hydraulicky hladké potrubí, používáme empirický vztah (14), který odvodil **Blasius** v roce 1913:¹

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad [1] \quad \text{pro } Re_k \leq Re \cdot 10^4 \quad (14)$$

Na základě výsledků z pokusů **Nikuradse** určil vzorec pro hladká potrubí (15):¹

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8\right]^2} \quad [1] \quad \text{pro } Re > 6 \cdot 10^4 \quad (15)$$

Při uvažování drsnosti potrubí se používá vztah podle **Altšula**, kde drsnost je vyjádřena explicitně ve formě (16):¹

$$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re} + \frac{k}{d}\right)^{0,25} \quad [1] \quad (16)$$

Toto platí pro oblast, kde se uplatňuje vliv Reynoldsova čísla, tak i zároveň drsnosti oblasti smíšeného tření. Pro tuto oblast bylo odvozeno hned několik desítek rovnic, za nejpřesnější je považován vztah (17), který definoval **Colebrook**:¹

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log\left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}}\right) + 0,27 \cdot \frac{k}{d}\right]^2} \quad [1] \quad (17)$$

Z důvodu nutnosti řešení rovnice implicitně byla odvozena vhodnější rovnice **Churchillem** (18):¹

$$\lambda = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(a+b)^{1,5}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad [1] \quad (18)$$

$$a = \left[-2,457 \cdot \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \varepsilon \right) \right]^{16} \quad b = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

2.2 Místní odpory (ztráty)

Kromě ztrát třením se v potrubní síti dále vyskytují ztráty místní v armaturách a tvarovkách, např. ventilech, šoupátkách, klapkách, vodoměrech, filtrech, kolenech, odbočkách, redukcích a jiných dalších komponentech. Díky tomu vzniká v těchto prvcích tlaková ztráta podobně jako v přímém potrubí. Tyto ztráty bývají intenzivnější než na přímém úseku potrubí vzhledem k tomu, že při průtoku těmito částmi dochází i ke změně tvaru průtočného kanálu, směru proudění a často i k víření. ³

Velikost místních odporů neboli ztrátová energie v místních ztrátách se vyjadřuje podobným způsobem jako ztráty třením. Vyjádří se tlakovou ztrátou p_z , ztrátovou výškou h_z a součinitelem místních ztrát ζ (19). ²

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19)$$

Místní ztráty v potrubí lze vyjádřit také ekvivalentní délkou potrubí l_e , na které je třecí odpor stejně velký jako místní odpor (20). ²

$$\zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \Rightarrow l_e = \frac{\zeta}{\lambda} \cdot d \quad [\text{m}] \quad (20)$$

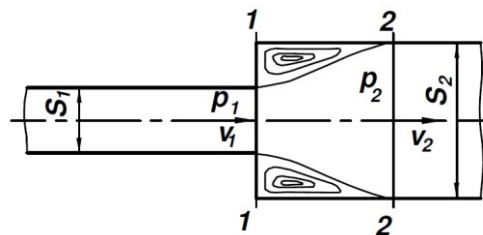
Součinitel místní ztráty ζ se určuje především měřením tlakové difference před a za zkoumaným prvkem při obvyklém provozním proudění. ³

Projev vlivu Reynoldsova čísla je podobný jako u třecích ztrát a to především u malých hodnot. Součinitel místní ztráty ζ závisí na konstrukčních parametrech, drsnosti stěn prvku, tvaru rychlostního profilu a režimu proudění kapaliny. U některých jednoduchých

geometricky přesně definovaných případů, jako je například náhlé rozšíření průřezu, je možné ztrátovou výšku odvodit matematicky. Borda pro tento případ definoval vztah ve tvaru (21):²

$$h_z = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (21)$$

Ztrátovou výšku je možné vyjádřit v závislosti na rychlosti proudění v_1 , která je v úzkém potrubí, a rychlosti proudění v_2 už v rozšířeném profilu, viz obr. 1.¹



Obrázek 1 – náhlé rozšíření profilu¹

$$h_z = \zeta_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \zeta_2 \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (22)$$

Z rovnice pro výpočet ztrátové výšky (22) lze odvodit vztah pro přepočtení součinitelů místní ztráty z rychlostí proudění a z průtočné plochy (23).²

$$\zeta_1 = \zeta_2 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 = \zeta_2 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 \quad [1] \quad (23)$$

Matematické odvození součinitele místní ztráty je možné i pro náhlé zúžení potrubí, případně kuželová potrubí, pro většinu složitějších tvarovek a armatur je však nutné jej stanovit experimentálně.³

3 Návrh a realizace vodní tratě pro měření

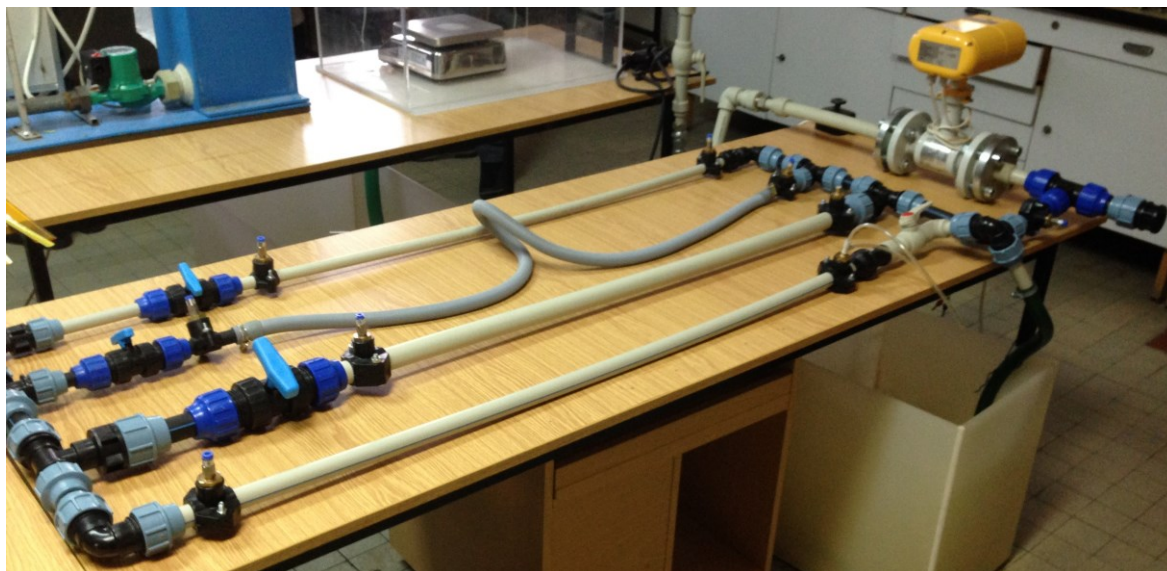
Vodní tratí rozumíme zkušební obvod, na kterém lze v laboratorních podmínkách provádět experimentální měření. Vodní trať se skládá především z hydraulického vedení např. z potrubí nebo hadic. Dále vodní trať zahrnuje nádrž, ze které je čerpadlem nasávána voda a vháněna do obvodu. Trať může např. obsahovat další různé prvky, např. uzavírací ventily, clonu pro měření rychlosti proudění kapaliny, odběrná místa pro měření tlaku aj. podle zkoumané problematiky.⁴

Před realizací měření byly zvažovány dvě varianty zkušební tratě. První variantou byla úprava stávajícího hydraulického obvodu v laboratoři Mechaniky tekutin E306, který slouží pro měření třecích ztrát a řešení sériového a paralelního řazení potrubí⁴. Omezujícím parametrem zde byla maximální světlost potrubí DN 40.

Druhou variantou bylo využití stávající tratě v Laboratoři vědy a výzkumu N108 v budově N. Experimentální zařízení slouží pro měření charakteristik ventilů a testování problematiky kavitace ve ventilu. Lze určit základní koeficienty ventilů, např. průtokový koeficient, kavitační koeficient, odporový koeficient. Je možné také provést měření místní ztráty pro jiné tvarovky a armatury.

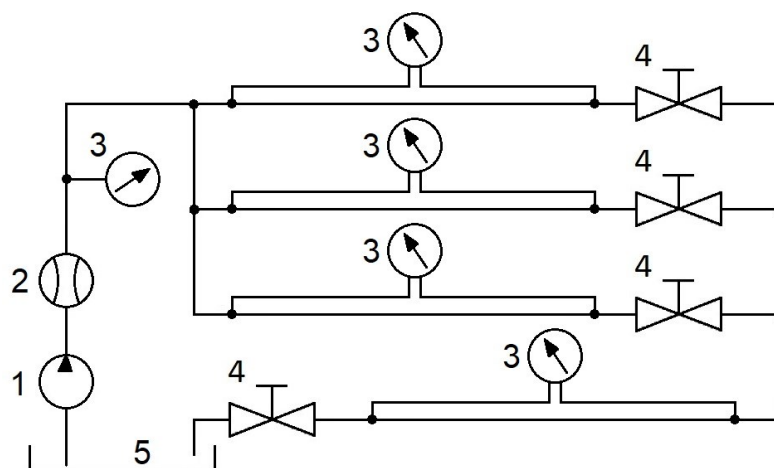
3.1 Návrh vodní tratě v laboratoři E 306

Pro změření tlakové ztráty na filtračním sítku je nutné jej vložit do potrubního systému. Pro možnost demontáže a následné výměny vzorků sít je vhodné použít dvojice přírub, mezi které se sítko vloží. Sítko se používají k filtraci protékající kapaliny, v našem případě vody. Nežádoucím projevem sítka v potrubí je vytvoření místního odporu. Tento odpor se projeví tlakovou ztrátou neboli tlakovým poklesem za sítkem ve směru proudění. V závislosti na rychlosti proudění a na vodní trati lze tyto charakteristiky měřit, tudíž vodní trať musí obsahovat odběrná místa před a za sítkem, tlakoměr, průtokoměr, dále prvky, díky kterým je možno regulovat průtok. Vodní trať v Laboratoři mechaniky tekutin je zobrazena na následujícím obrázku (obr 2).⁵



Obrázek 2 - Vodní trať pro měření třecích ztrát a spolupráce porubí

Jejími základními prvky je nádrž, čerpadlo, čtyři paralelní vedení různého průměru, v jednom případě hadice, čtyři kulovými ventily. K měření průtoku je použit indukční průtokoměr značky ELIS PLZENĚ a.s. Dále odbod obsahuje několik odběrných míst k měření tlaku vždy před a za jednotlivým potrubím. Jedno odběrné místo pro měření tlaku je hned za průtokoměrem můžeme vidět na schématu (obr. 3) a seznam komponent v tab. 1.






Obrázek 3 - Schéma vodní tratě pro měření třecích ztrát a spolupráce porubí

Tabulka 1 - Seznam komponent

Č.	Název komponenty	Označení/Typ	Počet ks	Výrobce
1	Čerpadlo	TOP-S30/10	1	WILO
2	Průtokoměr	FN 2014.1	1	ELIS PLZEŇ
3	Manometr	BHV 5355	1	BHV senzory s.r.o.
4	Uzavírací ventil	SVEK032XXX	4	WAVIN Ekoplastik, s.r.o.
5	Nádrž	80 dm ³	1	Valter Špalek - Plexi

3.2 Specifikace komponent v laboratoři E306

Tabulka 2 - Specifikace komponent v laboratoři E306 ^{4, 6, 7, 8}

Č. 1	Čerpadlo	
Výrobce:	WILO	
Typ:	TOP-S30/10	
Otáčky:	2400/2550/2700 min ⁻¹	
Výkon:	335/385/390 W	
Č. 2	Průtokoměr	
Výrobce:	ELIS PLZEŇ a.s.	
Typ:	Indukční FN 2014.1	
Průtok:	Min/max = 0,45/45 m ³ ·h ⁻¹	
Průtok:	±0,2 % pro 10 - 100 % Q _{max} ±0,5 % pro 5 - 100 % Q _{max}	
Č. 3	Manometr	
Výrobce:	BHV senzory s.r.o.	
Typ:	BHV 5355	
Rozsah:	0 – 200 kPa	
Statický tlak:	do 600 kPa	
Přesnost:	0,5 %	

Obrázek 4 - Čerpadlo WILO

Obrázek 5 - Průtokoměr

Obrázek 6 – Manometr

Úprava tratě by spočívala v nahrazení jedné z větví potrubím o světlosti 40mm typu STR040P16X s dvojicí přírub UNI1011 pro sevření sítka, dále doplněním o odběrná místa 40x1/2" k měření tlakové difference před a za sítkem. Redukce potrubí by byla provedena redukčními spojkami 40x25 a 40x32. K ovládání průtoku by zde bylo možno využít kulový kohout 40x40 pro připojení trubek PE. Všechny komponenty potřebné k uskutečnění měření jsou zaneseny do tab. 3 včetně přibližné cenové kalkulace.

Tabulka 3 - Přibližná kalkulace rozšiřujících komponent

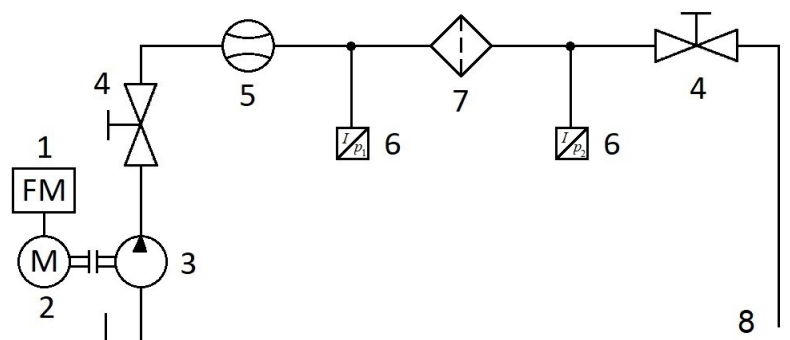
Položka	Počet ks	Cena [Kč]	Σ [Kč]
Příruba UNI1011	2	300	600
Spojka redukovaná 40x32	1	90	90
Spojka redukovaná 40x25	1	90	90
Navrtávka 40x1/2"	2	30	60
Kulový kohout 40x40	1	532	532
Potrubí STR040P16X 4m	1	288	288
Σ			1660

3.3 Vodní trať v laboratoři N108

Vzhledem k nutné úpravě stávající tratě a zakoupení dalších potřebných komponent pro doplnění obvodu tak, aby splňoval požadavky měření, byla zvážena druhá varianta měření v laboratoři N108. Jedním z důvodů bylo i to, že na této trati byla měřena filtrační armatura s různými druhy filtračních vložek. Tato trať nepotřebovala větší zásah do konstrukce a doplnění o další komponenty a odpovídala všem požadavkům pro měření zadané problematiky, viz obr. 7 a schéma na obr. 8.



Obrázek 7 - Vodní trať pro měření místní ztráty na sítku



Obrázek 8 - Schéma vodní tratě




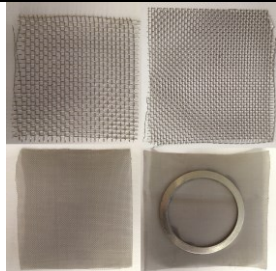
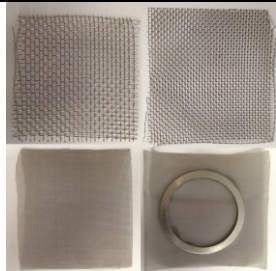
Tabulka 4 - Seznam komponent

Č.	Název komponenty	Označení/Typ	Počet ks	Výrobce
1	Frekvenční měnič	V1000 1/8 – 25 HP	1	YASKAWA
2	Elektromotor	Q2E FC 112M2C	1	TEE
3	Čerpadlo	Helix V1605	1	WILO
4	Uzavírací ventil	PPSA 40 -PE-E	2	PCV ALFA
5	Průtokoměr	FN2014PFEDN50	1	ELIS PLZEŇ
6	Snímač tlaku	3403-32-71.37A	2	HYDROTECHNIK
7	Filtrační síto	Testovací vzorek	1	Armatury Group
8	Nádrž	50000014785	1	VŠB-TUO

3.4 Specifikace komponent laboratoři N108

Tabulka 5 - Specifikace komponent laboratoři N108 7, 9, 10, 11

Č. 1	Frekvenční měnič	
Výrobce:	YASKAWA	
Typ:	V1000 1/8 – 25 HP	
Rozsah regulace otáček:	1:100	
Jmenovité hodnoty:	200 V 1fázové 0,1 až 4 kW 200 V 3fázové 0,1 až 15 kW 400 V 3fázové 0,2 až 15 kW	<p>Obrázek 9 - Frekvenční měnič</p>

Č. 2 Č. 3	Čerpadlo	
Výrobce:	Wilo	
Typ:	Helix V1605	
Průtok:	$16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	
Frekvence:	50/60 Hz	
Č. 5	Průtokoměr	
Výrobce:	Elis Plzeň a.s.	
Typ:	Indukční FLONET FN20XX.1	
Velikost:	DN 50	
Průtok:	Min/max = $0,72/72 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	
Přesnost:	$\pm 0,2 \%$ pro 10 - 100 % Q_{\max} $\pm 0,5 \%$ pro 5 - 100 % Q_{\max}	
Č. 6	Měření tlaku	
Výrobce:	Hydrotechnik GmbH	
Převodník:	5050	
Snímač:	HySense PR 310	
Rozsah	-0,1 až 0,6 MPa	
Převedená veličina:	4 až 20 mA	
Přesnost:	$\pm 0,25 \%$ při 22 °C	
Č. 7	Sítka filtru	
Výrobce:	Armatury Group a.s.	
Typ:	Zkušební vzorek	

Obrázek 10 - Odstředivé čerpadlo

Obrázek 11 - Průtokoměr

Obrázek 12 - Převodník a snímač tlaku

Obrázek 13 - Zkušební vzorky sítka

4 Metody měření tlaku a průtoku

Pro zkoumání místních odporů je potřeba zjistit takovou diferenci p_z před a za měřeným elementem ve směru proudění. Současně se měří hodnota průtoku pro vyhodnocení závislosti $\Delta p = f(Q_v)$.

4.1 Měření tlaku

Tlak se definuje poměrem derivace síly k derivaci plochy. Jednotka tlaku je Pa. 1 Pa je velice malá hodnota v běžné praxi, proto se používají násobky hPa, kPa a MPa. Tlak o hodnotě 0 Pa se přisuzuje prostoru, v němž by nebyla žádná hmota. Barometrickým tlakem nazýváme tlak vzduchu na zemském povrchu. Pokud měříme tlaky od nulového tlaku, nazýváme jej tlak absolutní. Když je absolutní vyšší než tlak barometrický uvádíme tento rozdíl jako přetlak, v opačném případě mluvíme o podtlaku nebo vakuu. Přístrojů a způsobů jak tato tlaky měřit je velké množství: ¹²

Kapalinové tlakoměry jsou jednoduché měřicí přístroje využívající působení hydrostatického tlaku. Jejich výhodou je velice přesné a spolehlivé snímání naměřených údajů. Využívají se především k laboratornímu měření. Nevýhoda těchto tlakoměrů spočívá v neschopnosti poskytnout signál vhodný k dalšímu zpracování nebo pro dálkový přenos. ¹²

Deformační tlakoměry s elastickým členem využívají principu deformace pružných elementů, který mění své rozměrové parametry v závislosti na přivedeném tlaku. Tyto manometry se liší podle uložení a konstrukce deformačního elementu. Jejich výhodou je přetížitelnost, nejsou závislé na pracovní poloze, provedení pro náročné provozní podmínky, velké rozsahy tlaků. Patří zde Bourdonův, membránový, vlnovcový manometr. ¹³

Tlakoměry se silovým účinkem se využívá principu převedení tlaku na měření síly. Tlakový účinek je v rovnováze s působícím silovým účinkem. Jsou velice přesné. Slouží k cejchování ostatních druhů tlakoměrů. Zde patří především tlakoměry pístové a prstencové. ¹³

Tenzometrické snímače tlaku fungují díky pružné deformaci materiálu, kterou měříme odporovým tenzometrem. Tenzometr je elektrický vodič, který při prodloužení změní svůj elektrický odpor a díky tomuto jevu lze zaznamenávat deformaci materiálu. Výhoda tenzometrických snímačů spočívá v možnosti zaznamenávat dynamické děje. ¹³

Piezoelektrické snímače tlaku funguje na principu piezoelektrického jevu, kdy krystal křemíku vytváří elektrický náboj v důsledku působení tlaku. Vygenerovaný náboj je příliš malý, proto je třeba zesilovač, aby bylo dosaženo dostatečného výstupního napětí. Rychlost nabíjení náboje je úměrná rychlosti působené síly. Výstupní odezva může dosáhnout až 100 Hz tudíž se snímače hodí i pro zaznamenávání dynamických jevů.¹³

4.2 Měření rychlosti a průtoku

Zkoumání střední rychlost a průtoku je součástí základních měření v hydromechanice. Existuje nepřeberné množství průmyslově vyráběných přístrojů, jako jsou např. škrťací prvky, rotametry pro malé průtoky, indukční průtokoměry, sondy různých provedení nejčastěji rozšířeny jsou Prandtlova a Pitotova trubice, v laboratorních podmínkách například použití vážení odměrných nádob.¹³

Měření průtoku tekutin pomocí snímačů rozdílu tlaku využívá principu místní ztráty na ocejchované cloně, dýze Venturiho dýze nebo trubici. Za přesně definovaných podmínek, lze díky závislosti mezi tlakovou diferencí a průtokem tekutiny nahradit přímé měření průtoku měřením tlakové difference před a za škrťacím orgánem a těmto hodnotám přiřadit určitou velikost průtoku.¹³

Plovákový průtokoměr – rotametr je tvořen kuželovou trubicí, která se ve směru nahoru rozšiřuje. V prostřední části je plovák. Proud vody naráží do plováku, který je zvedán do výšky úměrné k rychlosti proudění. Měření průtoku vyhodnocováno na základě polohy plováku. Používá se zejména pro měření malých průtočných množství kapalin a plynů. Automaticky lze sledovat polohu plováku například pomocí indukčního snímače s možností dálkového přenosu signálu.¹³

Rychlostní průtokoměry obsahují lopatková kola, která jsou kinetickou energii proudu tekutiny uváděna do rotačního pohybu. Během otáčení kola vznikají hydraulické ztráty a v ložiskách rotoru třecí ztráty. Díky tomu vzniká skluz, který se zvětšuje se snižováním rychlosti proudění kapaliny a tím narůstá chyba měření. Tento jev se především projevuje u kapalin, jejichž viskozita se s teplotou výrazně mění. K zaznamenávání počtu otáček se využívá indukčních snímačů.¹³

Vírové průtokoměry využívají principu vzniku Karmánových vírů při obtékání tělesa uloženého napříč průtočného průřezu a kolmo na směr proudění tekutiny. Od určité velikosti Re je vznik vírů přímo úměrný frekvenci generovaných vírů. Průtokoměry se liší především

tvarem vloženého tělesa, místem a principem snímání frekvence vzniku vírů. Snímání se provádí vysokofrekvenčními snímači typu, jako jsou např. žhavené drátky, termistory, tenzometry, kapacitní a ultrazvukové snímače. Měřicí rozsah bývá ovlivněn počtem frekvencí vírů s Re minimálně 3000 a maximální rozsah je omezen vznikem kavitace v kapalině nebo nadměrnou expanzí u plynů.¹³

Průtokoměr s obtékaným diskem je založen na principu obtékání terče ve tvaru kruhu měrnou kapalinou. Terč je spojen s vetknutým nosníkem. Ohyb vzniklý prouděním kapaliny je snímán tenzometricky a jeho velikost je přímo úměrná rychlosti proudění. Měření je lineární od určité hodnoty Re . Vhodná tuhost nosníku zajistí dosažení optimální vlastní úhlové frekvence měřidla, které pak může být použito do maximální frekvence 50 Hz u dynamického měření.¹³

Ultra zvukové průtokoměry k měření využívají změny rychlosti šíření ultrazvukových vln ve směru proudění a proti směru proudění kapaliny. Měří se potřebný čas k tomu, aby se signál z generátoru dostal k přijímači. Generující signál o frekvenci nad 20 kHz. Výhoda ultrazvukových průtokoměrů je, že nemají žádné pohyblivé části, v průtočném potrubí nejsou žádné překážky a kapaliny mohou být agresivní nebo výbušné.¹³

Žárový anemometr funguje díky tomu, že protékající kapalina odvádí teplo z elektricky ohřívaného čidla, které bývá žhavený drátek nebo fólie. Odvod tepla je přímo úměrné rychlosti proudění kapaliny. U měření elektricky nevodivých kapalin se používají sondy, které nejsou povrchově zaizolovány. Izolace je nutná při měření elektricky vodivých kapalin, jako je například voda. Velice malá hmotnost sondy má pozitivní vliv na tepelnou setrvačnost, proto se používají pro měření pulzací rychlostí s vysokými frekvencemi.¹³

Optický – laserový anemometr – LDA (Laser Dopplerovský Anemometr) využívá Dopplerova efektu, pole kterého se při relativním pohybu zdroje a přijímače frekvence vln posílaného zdrojem vzhledem k přijímači mění.¹³

Nezatížený hydromotor se často v hydraulických mechanismů používá jako způsob pro měření průtoku, především pro svoji jednoduchost a spolehlivost. Měří se otáčky nezatíženého hydromotoru, kterým protéká kapalina. K měření otáček se používá fotosnímače nebo tachodynamu. Přesnost je lepší než 1 % a zároveň nezávisí na viskozitě měřené kapaliny.¹³

Indukční průtokoměr funguje na principu Faradayova zákona (elektromagnetické indukce), kde vodič pohybující se v homogenním magnetickém poli nahrazuje proudící kapalina, která musí být elektricky vodivá. Snímání indukovaného napětí se provádí dvěma protilehlými elektrodami, které jsou umístěny na vnitřní stěně trubky tak, aby mezi nimi procházel magnetický tok.⁷

4.3 Použitá měřicí technika pro určení tlakové ztráty a průtoku na měřicí trati

Měření tlakové difference probíhalo zaznamenáváním hodnot snímaných dvojicí tlakových snímačů značky Hydrotechnik GmbH řady HySense PR 310, viz obr.12 . Tento snímač tlaku má velmi rychlou dobu odezvy. Snímače fungují na piezo-rezistivním principu, kdy silikonovým čipem v nerezovém plášti protéká elektrický proud o hodnotě 4 až 20 mA. Dále pro převod elektrického proudu byl využit A/D převodník Hydrotechnik 5050, na kterém je možno odečítat naměřené údaje.¹¹

Měření průtoku je zajištěno průtokoměrem značky Elis Plzeň a.s. řady FLONET FN 20XX.1, viz obr. 11, pracuje na výše popsaném indukčním principu. Minimální požadovaná vodivost měřeného média je 20 $\mu\text{S/cm}$. Měřidlo zobrazuje na alfanumerickém dvouřádkovém displeji aktuální hodnotu objemového průtoku vodivých kapalin v uzavřeném potrubí. Velikost třídy DN50 umožňuje měření průtoku od 0,72 do 72 m^3h^{-1} . Všechny funkce a parametry výstupů lze uživatelsky měnit za provozu.⁷

5 Postup měření pro vybraná síťka a zadané podmínky

Měření probíhalo na vodní trati, kde regulace otáček čerpadla byla ovládána frekvenčním měničem, viz obr 14. Frekvenční měnič byl v průběhu měření nastavován od 10 Hz, kdy po nastavení frekvence bylo nutné počkat na ustálení průtoku a až poté odečítat data z měřidel. Každé měření se měřilo s přírůstkem 2 Hz až do 34 Hz, přičemž tento přírůstek znamenal přibližně $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

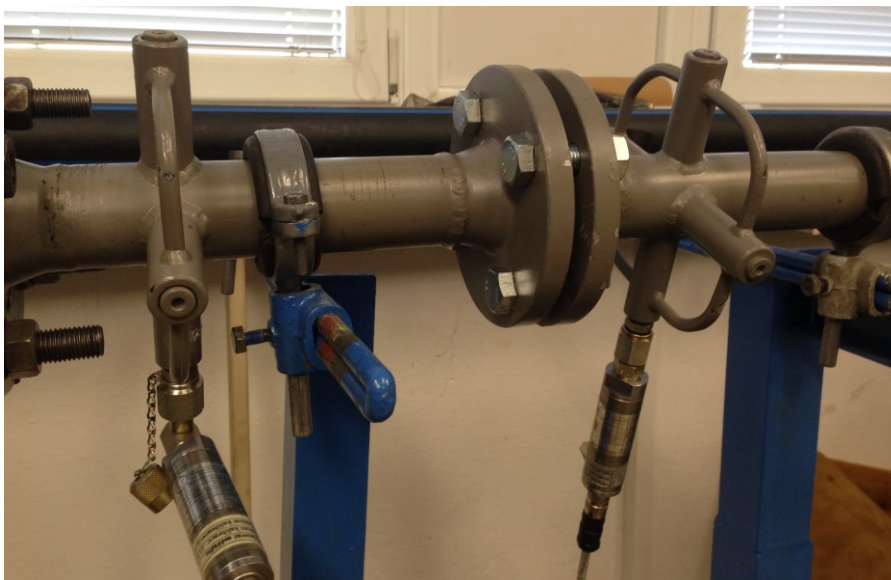


Obrázek 14 – Vlevo frekvenční měnič, vpravo nahoře elektromotor, dole čerpadlo

V potrubí je také za místem měření tlaku p_2 umístěný kulový ventil, který slouží k vytvoření umělého odporu v potrubí, aby v potrubí proudila voda, která vyplňuje celý průřez potrubí. Tento ventil byl nastaven předem a jeho nastavení bylo po celou dobu měření všech sítěk stejné, aby byly zachovány stejné podmínky.

5.1 Umístění vzorků do obvodu

Místní ztráty měříme na prvcích, které jsou součástí vodní tratě. Součástí vodní tratě kromě měřeného elementu a dalších nezbytně nutných prvků jako jsou například čerpadlo, nádrž na kapalinu apod. jsou nutné snímací prvky, díky kterým zaznamenáváme data. Konkrétně v našem případě indukční průtokoměr a dvojice tlakových snímačů vždy před a za zkoumaným vzorkem, které jsou řazeny sériově, viz obr 15. Na obrázku lze také vidět dvojici přírub, mezi kterými jsou zkušební vzorky filtračních sítěk umístěny.

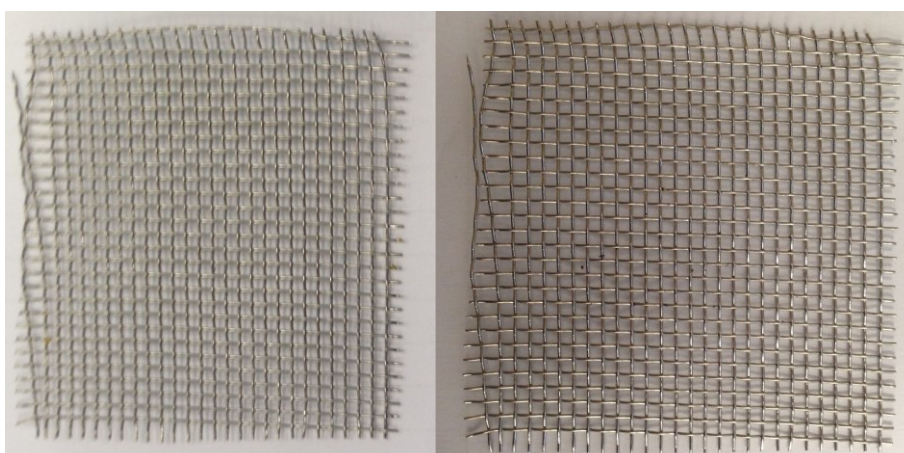


Obrázek 15 – Umístění vzorku a tlakových snímačů pro měření tlaku p_1 a p_2

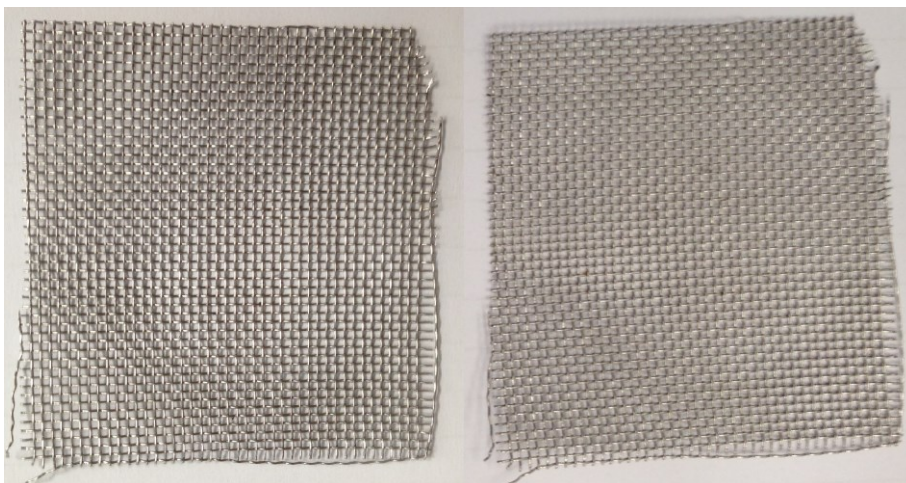
5.2 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky dodané firmou ARMATURY Group a.s. jsou čtvercové ústřižky pletiva z nerezové oceli přibližně o 70 až 80 mm dlouhé straně. Toto pletivo se používá k výrobě filtračních vložek, které se umísťují do armatury filtru. Tyto filtry slouží k filtrování prouděného média od mechanických nečistot různých velikostí podle velikosti ok filtrační vložky. Obdržená filtrační sítky jsou se čtyřmi různými velikostmi ok a drátů, podle velikosti od nejhrubšího jsou označena jako S1, S2, S3 a až po nejjemnější S4.

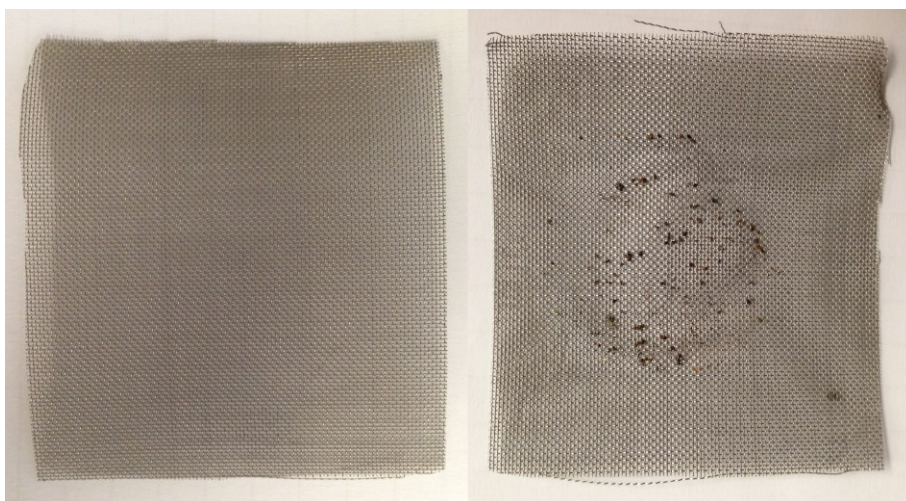
Sítka lze vidět na obr. 16 až 19 vždy fotografie vlevo před měřením a vpravo fotografie po změření vzorku. Na fotografiích vpravo lze pozorovat zachycené nečistoty, které se nacházely v proudící vodě.



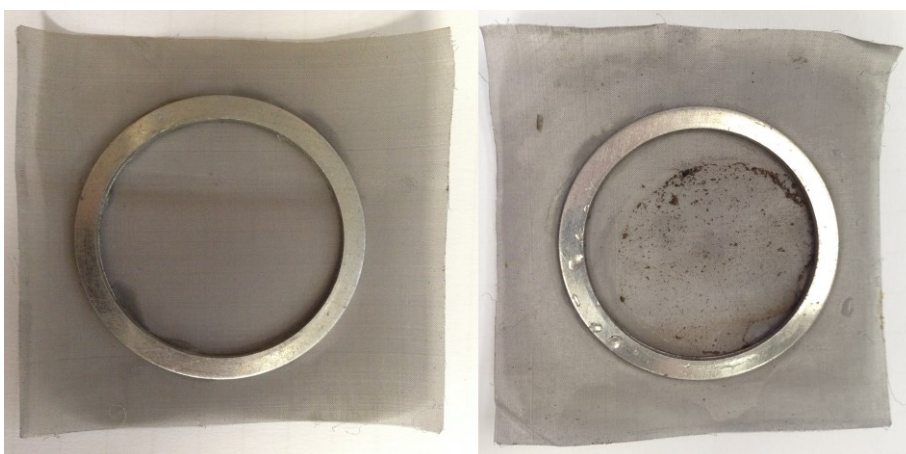
Obrázek 16 – Vzorek sítky S1: vlevo před měřením, vpravo po měření



Obrázek 17 – Vzorek sítky S2: vlevo před měření, vpravo po měření



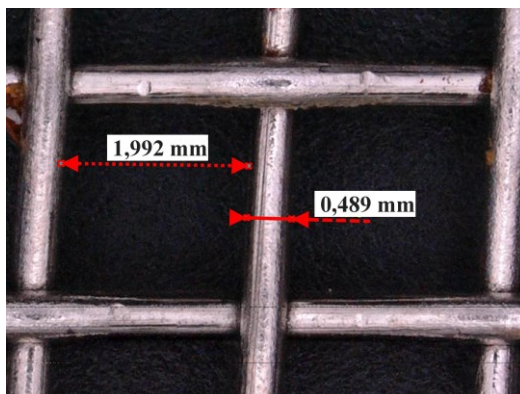
Obrázek 18 – Vzorek sítky S3: vlevo před měření, vpravo po měření



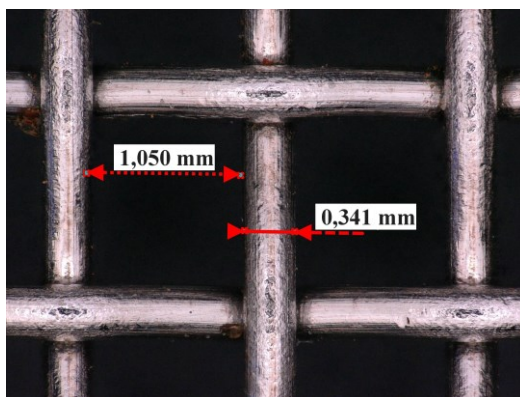
Obrázek 19 – Vzorek sítky S4: vlevo před měření, vpravo po měření

Kovový kroužek na vzorku filtračního sítky S4 je přilepen z důvodu, aby nebyl vzorek vtažen do potrubí působením proudu kapaliny. Kroužek byl umístěn tak aby nezakrýval průtočný průřez potrubí.

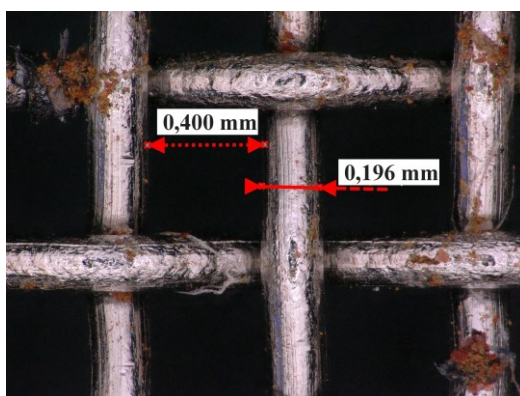
Pro přesné zjištění parametrů sítok, kterými jsou průměr drátu dd a velikost mezery mezi sítky do , byla síťka změřena pomocí digitálního mikroskopu Keyence VHX-5000. Rozměry lze vidět na obr 20 až 23. Jednotlivě jsou sítka s rozměry zanesena do tab. 6.



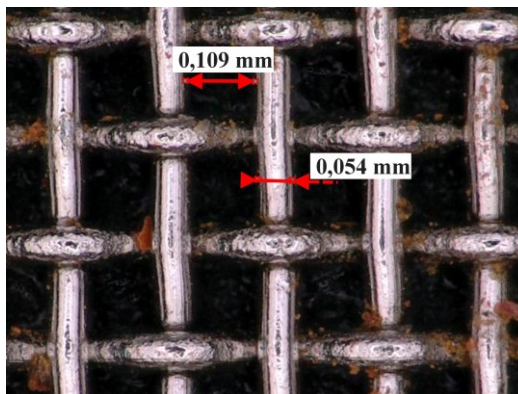
Obrázek 20 – Parametry sítka S1



Obrázek 21 – Parametry sítka S2



Obrázek 22 – Parametry sítka S3

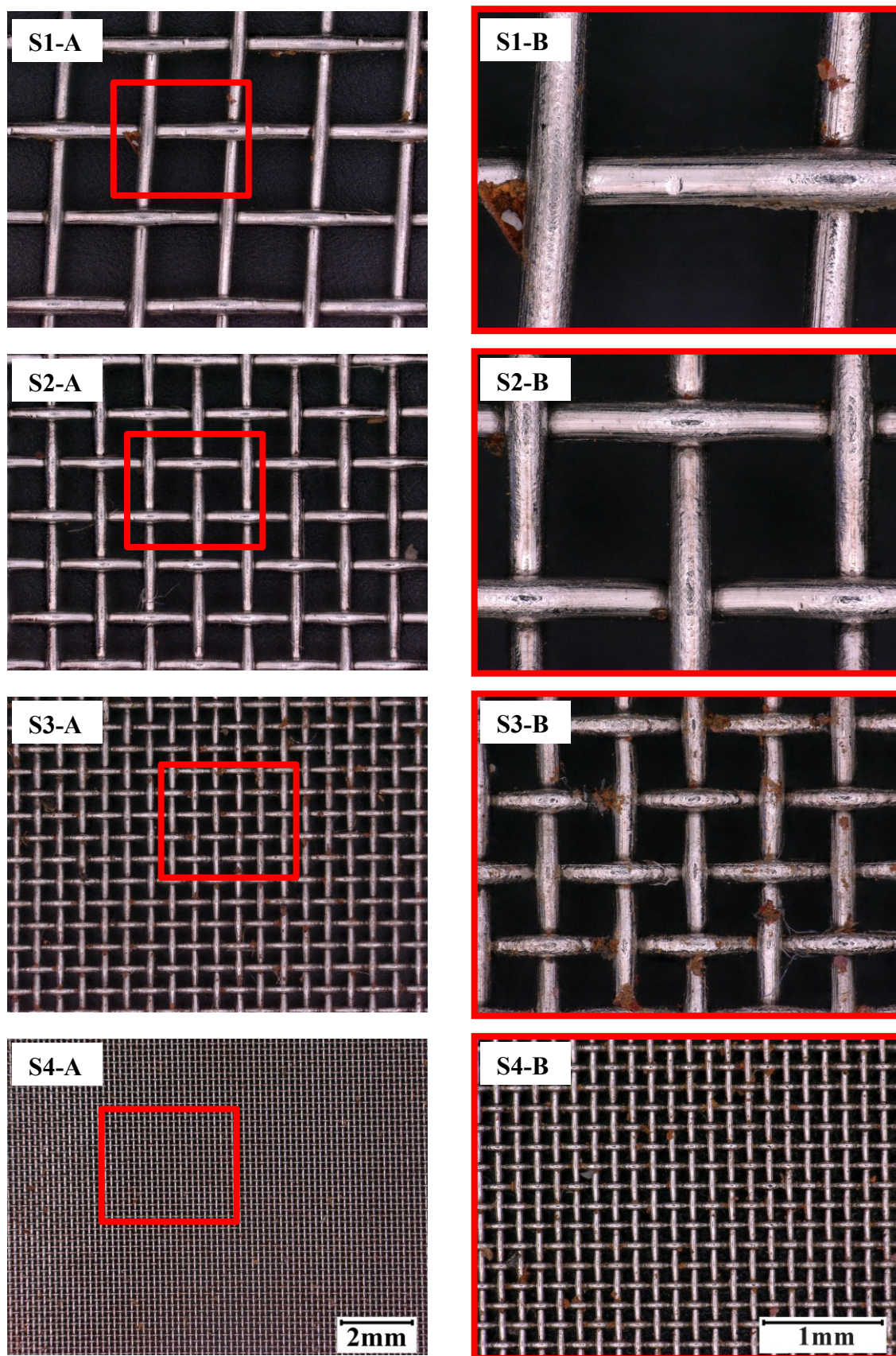


Obrázek 23 – Parametry sítky S4

Tabulka 6 – Parametry síték

	dd [mm]	do [mm]
S1	0,489	1,992
S2	0,341	1,050
S3	0,196	0,400
S3	0,054	0,109

Na obrázku 24 vidíme detaily filtračních síték použitých pro měření tlakové ztráty. Vlevo na obrázku jsou umístěny fotografie zkoumaných síték s označením S1-A, S2-A, S3-A a S4-A. Na fotografiích je červeně ohraničena oblast, která byla detailně nasnímána pomocí digitálního mikroskopu VHX-5000. Vpravo pak vidíme stokrát zvětšený detail filtračních síték s označením S1-B, S2-B, S3-B a S4-B



Obrázek 24 – Fotografie detailu filtračních sítok

5.3 Postup měření

Před samotným měřením všech vzorků filtračních sítěk byl nastaven odpor v potrubí kulovým ventilem. Po vložení vzorku mezi příruby byly šrouby svírající vzorek dostatečně utaženy. Následně bylo nutné zkontrolovat vodní trať, jestli v určitých místech nepropouští vodu.

Měření probíhalo nastavením frekvence na frekvenčním měniči. Díky tomu se regulují otáčky čerpadla, které ovlivňovaly průtok kaplany. Po nastavení požadované frekvence bylo zkontrolováno průhledným potrubím, jestli je celý průřez potrubí zaplněn kapalinou.

Pokud se proud vody ustálil na konstantní hodnotě, bylo možné průtok Q_v odečíst z průtokoměru a zároveň zaznamenat tlaky před vzorkem p_1 a za vzorkem p_2 , které se zobrazily na displeji přístroje Hydrotechnik 5050. Po zaznamenání dat byla frekvence o 2 Hz zvýšena a celý proces byl opakován až do dosažení průtoku přibližně $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Poté se vyměnil vzorek filtračního sítka a postup se zopakoval.

5.4 Naměřená data

Měřená data jsou tlakové difference p_1 a p_2 v závislosti na průtoku Q_v . Indukční průtokoměr Elis FLONET FN20XX zaznamenává průtok v $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a tlakové snímače snímají tlak v jednotkách bar, které musejí být následně přepočítány na SI jednotky. Jako doplňkový údaj je zaznamenána i nastavená frekvence f na frekvenčním měniči.

Tabulka 7 - Naměřená data vzorek S1

Q_v [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	f [Hz]
5,104	0,055	0,026	10
6,168	0,085	0,043	12
7,252	0,134	0,073	14
8,317	0,197	0,119	16
9,374	0,288	0,189	18
10,442	0,380	0,252	20
11,511	0,482	0,320	22
12,544	0,598	0,394	24
13,638	0,720	0,475	26
14,672	0,852	0,562	28
15,745	0,992	0,655	30
16,822	1,140	0,750	32
17,820	1,329	0,855	34

Tabulka 8 - Naměřená data vzorek S2

Q_v [m ³ ·h ⁻¹]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	f [Hz]
4,823	0,093	0,065	10
5,955	0,142	0,102	12
7,090	0,201	0,145	14
8,192	0,270	0,195	16
9,303	0,351	0,251	18
11,613	0,492	0,326	22
12,656	0,604	0,400	24
13,719	0,722	0,481	26
14,794	0,852	0,568	28
15,814	0,995	0,659	30
16,859	1,158	0,755	32
17,904	1,320	0,857	34

Tabulka 9 - Naměřená data vzorek S3

Q_v [m ³ ·h ⁻¹]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	f [Hz]
4,655	0,11	0,044	10
5,642	0,182	0,074	12
6,570	0,294	0,105	14
7,455	0,406	0,143	16
8,372	0,540	0,183	18
9,353	0,705	0,195	20
10,219	0,895	0,222	22
11,177	1,080	0,274	24
12,128	1,271	0,342	26
13,078	1,489	0,413	28
13,865	1,758	0,494	30
14,562	2,030	0,564	32

Tabulka 10 - Naměřená data vzorek S4

Q_v [m ³ ·h ⁻¹]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	f [Hz]
0,546	1,003	0,007	16
0,476	1,289	0,007	18
0,600	1,607	0,007	20
0,790	1,954	0,007	22
0,885	2,337	0,007	24

Data měřitelná na vzorku S4, viz Tabulka 10, nebylo možné měřit v takovém rozsahu jako v předešlých měřeních a to z toho důvodu, že propustnost sítka byla tak malá, že bránilo průtoku kapaliny potrubím. Tlak před sítkem narůstal a z důvodu zvýšeného namáhání čerpadla bylo měření ukončeno.

6 Vyhodnocení výsledků

Měření probíhalo v laboratorních podmínkách na vodní trati v laboratoři N108 při teplotě okolo 22 °C. Před samotným vyhodnocením naměřených dat je nutné znát měrnou hmotnost ρ a viskozitu ν kapaliny, v našem případě vody, při teplotě 22 °C: ¹⁴

- měrná hmotnost $\rho = 998 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- kinematická viskozita $\nu = 1,004\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$

6.1 Příklad výpočtu

Vzniklé místní ztráty na měřeném vzorku filtračního sítko lze vyjádřit součinitelem místních ztrát ζ v závislosti na Reynoldsově číslu Re a dále také jako tlakovou ztrátu p_z v závislosti na objemovém průtoku Q_v . Pro větší přehlednost a správnost dosazování naměřených dat jsou veličiny definovány v základních jednotkách. Výpočty byly prováděny podle následujících vztahů.

Vztah (24) vyjadřuje tlakovou ztrátu p_z na vzorku filtračního sítko. Jedná se o rozdíl naměřeného tlaku p_1 před sítkem a naměřeného tlaku p_2 za sítkem. ⁵

$$p_z = p_1 - p_2 \quad [\text{Pa}] \quad (24)$$

$$p_z = 38000 - 25200 = 12800 \quad [\text{Pa}]$$

Výpočet rychlosti proudění kapaliny potrubím v je nutný pro následné dosazení do vztahu pro výpočet součinitele místních ztrát ζ a Reynoldsova čísla Re . Rychlost proudění vypočteme z objemového průtoku Q_v a z průtočné plochy potrubí, kterou získáme pomocí světlosti potrubí d , viz vztah (25). ⁵

$$v = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (25)$$

$$v = \frac{4 \cdot 0,002901}{\pi \cdot 0,04^2} = 2,31 \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

Součinitele místních ztrát ζ určíme z již vypočtených hodnot tlakové ztráty p_z na zkušebním vzorku sítka a rychlosti proudění kapaliny v potrubí v . Dále do vztahu (26) dosazujeme měrnou hmotnost vody ρ , která při teplotě vody 20 °C dosahuje hodnotu 998 kg·m⁻³.⁵

$$\zeta = \frac{2 \cdot p_z}{\rho \cdot v^2} \quad [1] \quad (26)$$

$$\zeta = \frac{2 \cdot 12800}{998 \cdot 2,31^2} = 4,815 \quad [1]$$

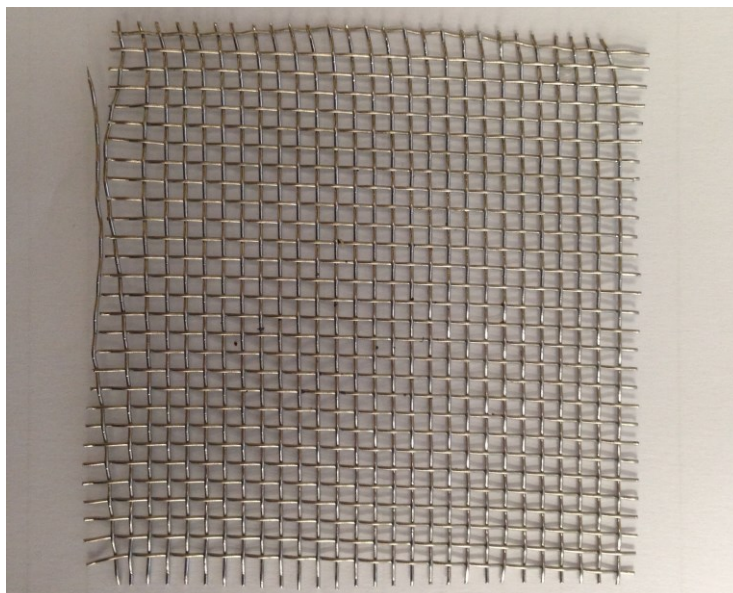
Součinitel místních ztrát ζ se vyhodnocuje v závislosti na Reynoldsově čísle Re . Reynoldsovo číslo Re se spočítá podle vztahu (27), do kterého dosadíme kinematickou viskozitu vody ν , rychlost proudění vody v a dále vnitřní průměr potrubí neboli světlost d .⁵

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad [1] \quad (27)$$

$$Re = \frac{2,31 \cdot 0,04}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 9,2 \cdot 10^4 \quad [1]$$

6.2 Vyhodnocení dat sítka S1

Dodané filtrační sítko S1 mělo největší otvory mezi dráty, tudíž předpokládáme, že na měřeném vzorku bude vznikat nejmenší tlaková ztráta p_z . Vzorek filtračního sítka lze vidět na obr. 25.



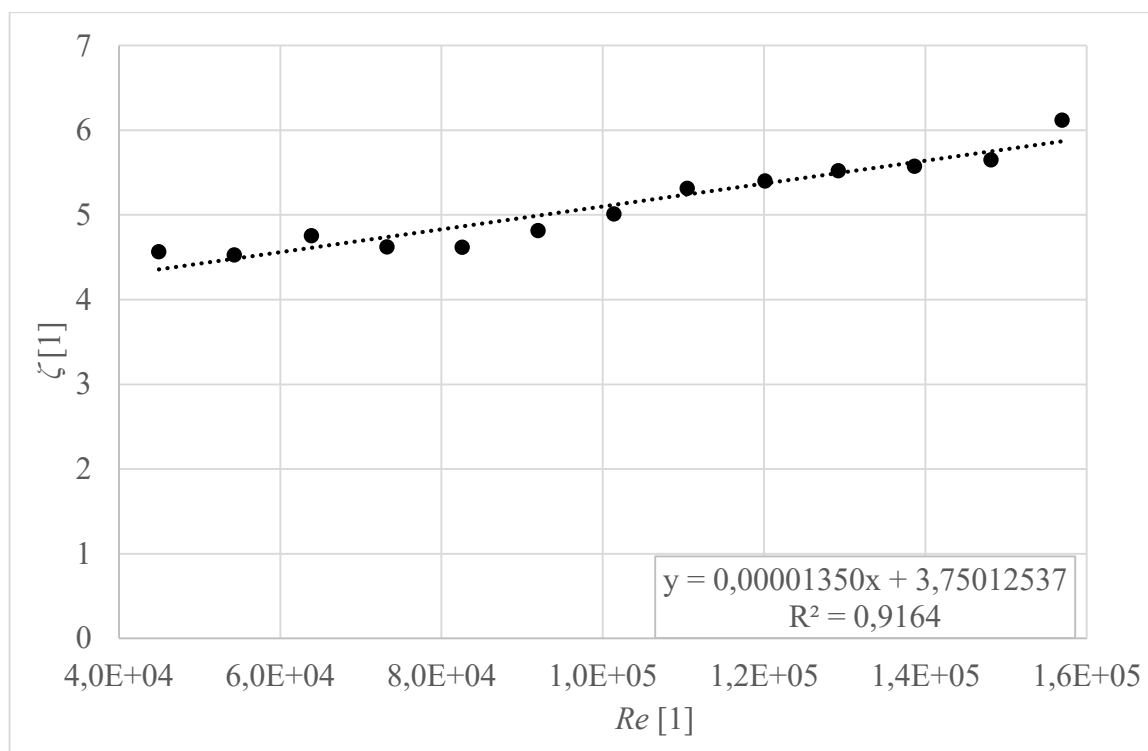
Obrázek 25 - Vzorek sítko S1

Přepočtené hodnoty jsou zapsány do tab. 11. Přepočty byly provedeny dle výše zmíněných vztahů. Výsledné závislosti jsou zaneseny do dvou grafů. Graf na obr. 26 vyjadřuje závislost Reynoldsova čísla Re na součiniteli místních ztrát ζ . Následující graf (obr. 27) který vyjadřuje závislost průtoku kapaliny Q_v na tlakové ztrátě p_z způsobenou filtračním vzorkem sítko S1

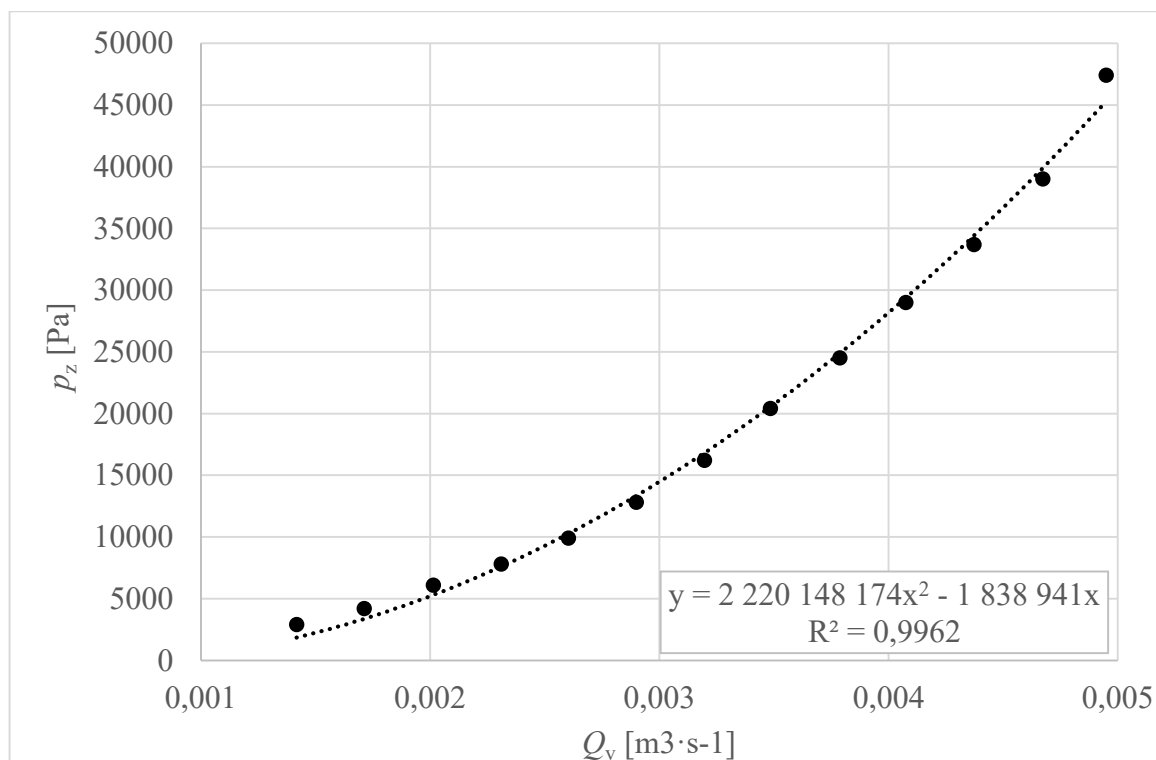
V obrázku 26 se graficky znázorněná závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovu čísla na vzorku sítko S1. Zde můžeme pozorovat, že součinitel místních ztrát jen velice nepatrně narůstá a proto jej lze považovat za konstantní. Díky tomuto můžeme tvrdit, že průměr $\zeta = 5,117$ v celém námi vyšetřovaném průběhu je konstantní.

Tabulka 11 - Přepočtené hodnoty sítko S1

Q_v [m ³ ·s ⁻¹]	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	p_z [Pa]	v [m·s ⁻¹]	ζ [1]	Re [1]
0,001418	5500	2600	2900	1,13	4,566	44949
0,001713	8500	4300	4200	1,36	4,528	54320
0,002014	13400	7300	6100	1,60	4,757	63866
0,002310	19700	11900	7800	1,84	4,625	73245
0,002604	28800	18900	9900	2,07	4,621	82554
0,002901	38000	25200	12800	2,31	4,815	91960
0,003198	48200	32000	16200	2,54	5,014	101374
0,003484	59800	39400	20400	2,77	5,317	110471
0,003788	72000	47500	24500	3,01	5,402	120106
0,004076	85200	56200	29000	3,24	5,525	129212
0,004374	99200	65500	33700	3,48	5,575	138662
0,004673	114000	75000	39000	3,72	5,652	148147
0,004950	132900	85500	47400	3,94	6,122	156936



Obrázek 26 - Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovu čísla na vzorku sítk S1

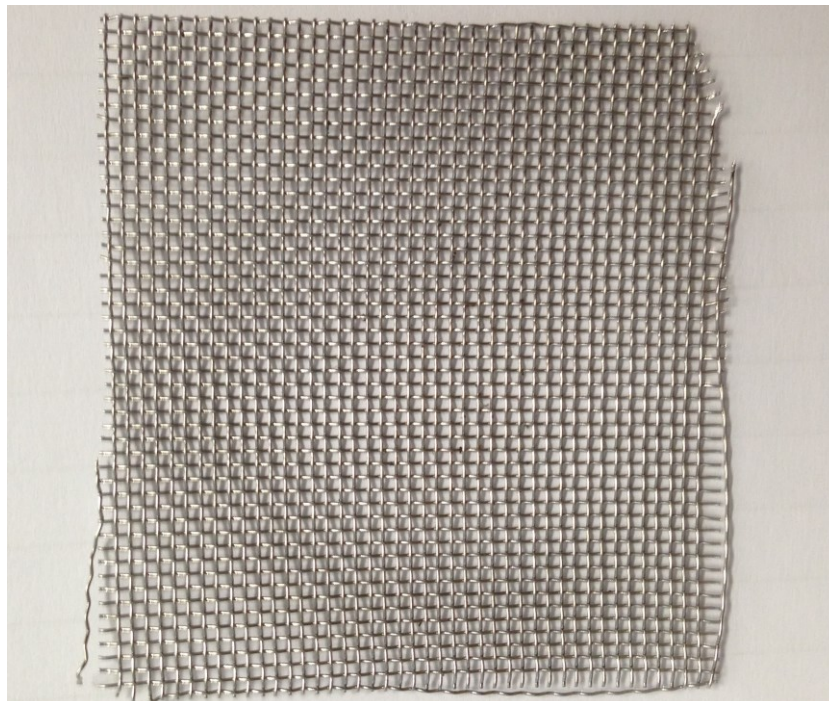


Obrázek 27 - Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro sítko S1

Grafické zobrazení hodnot Reynoldsových čísel bylo vyhodnoceno od 40000 do 160000 Re a průtoky byly vyhodnocovány z důvodu přehlednosti dat od 0,001 do 0,005 m³·s⁻¹.

6.3 Vyhodnocení dat sítka S2

Dodané filtrační sítko S2 mělo druhé největší otvory mezi dráty v porovnání se sítem S1. Vzorek filtračního sítka S2 lze vidět na obr. 28.

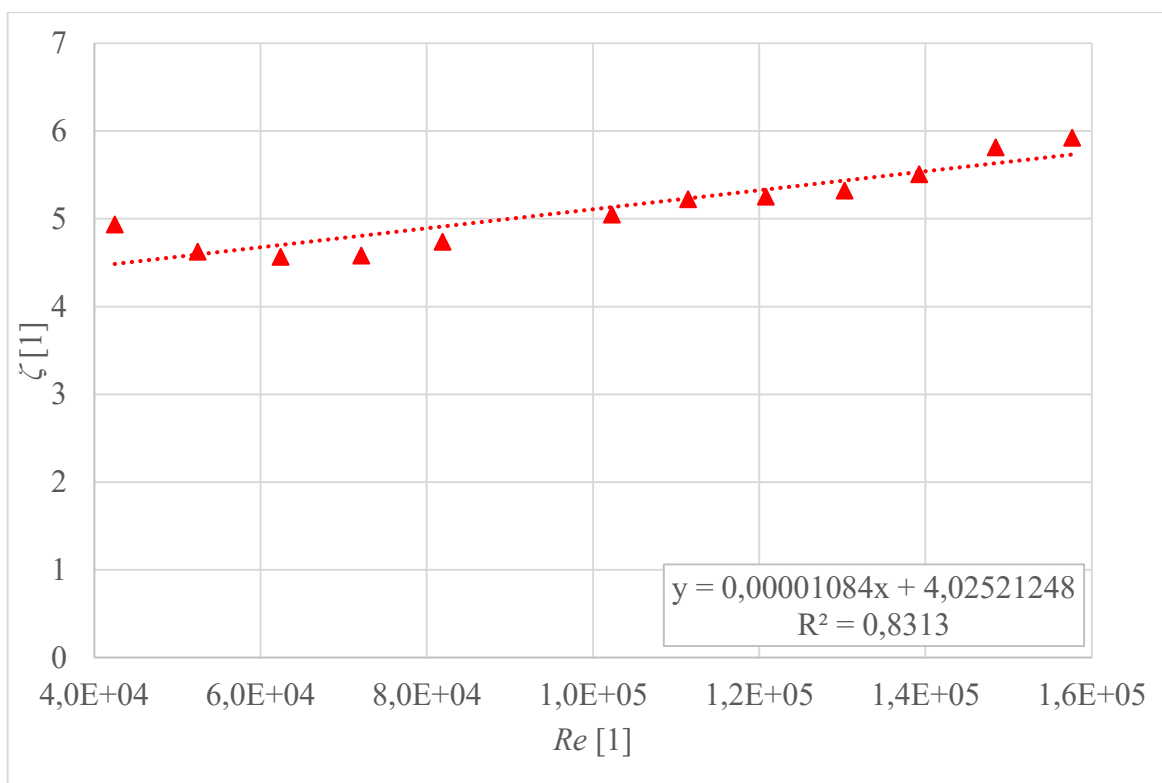


Obrázek 28 - Vzorek sítka S2

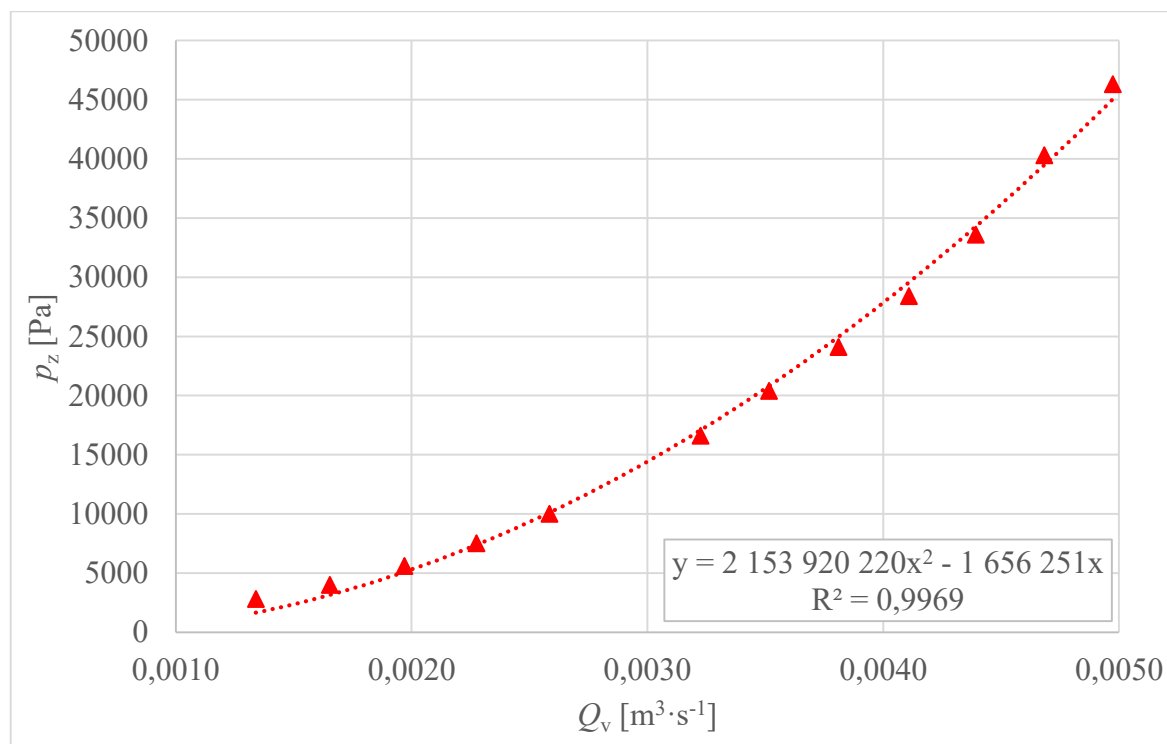
Hodnoty jsou zapsány do tab. 12. Graf na obr. 29 vyjadřuje závislost Reynoldsova čísla Re na součiniteli místních ztrát ζ . Následující graf (obr. 30) vyjadřuje závislost průtoku kapaliny Q_v na tlakové ztrátě p_z způsobenou vzorkem sítka S2. Taktéž u tohoto měření můžeme uvažovat, že $\zeta = 5,129$ v celém námi vyšetřovaném průběhu je konstantní.

Tabulka 12 - Přepočtené hodnoty sítka S2

Q_v	p_1	p_2	p_z	v	ζ	Re
$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{Pa}]$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[1]$	$[1]$
0,001340	9300	6500	2800	1,07	4,937	42475
0,001654	14200	10200	4000	1,32	4,626	52444
0,001969	20100	14500	5600	1,57	4,569	62440
0,002276	27000	19500	7500	1,81	4,584	72145
0,002584	35100	25100	10000	2,06	4,739	81929
0,003226	49200	32600	16600	2,57	5,048	102272
0,003516	60400	40000	20400	2,80	5,223	111458
0,003811	72200	48100	24100	3,03	5,252	120819
0,004109	85200	56800	28400	3,27	5,322	130287
0,004393	99500	65900	33600	3,50	5,510	139269
0,004683	115800	75500	40300	3,73	5,815	148472
0,004973	132000	85700	46300	3,96	5,924	157675



Obrázek 29 - Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovu čísla na vzorku sítk S2

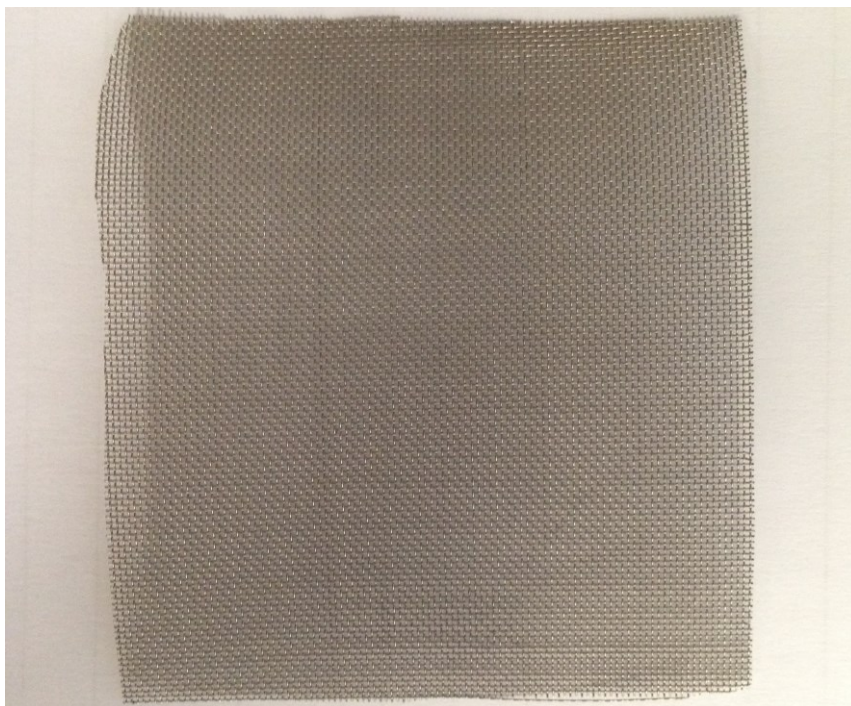


Obrázek 30 - Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro sítko S2

Grafické zobrazení hodnot Reynoldsových čísel bylo vyhodnoceno od 90000 do 160000 Re a průtoky byly vyhodnocovány z důvodu přehlednosti dat od 0,0025 do 0,0050 m³·s⁻¹.

6.4 Vyhodnocení dat sítka S3

Dodaný vzorek filtračního sítka S3 lze vidět na obr. 31.

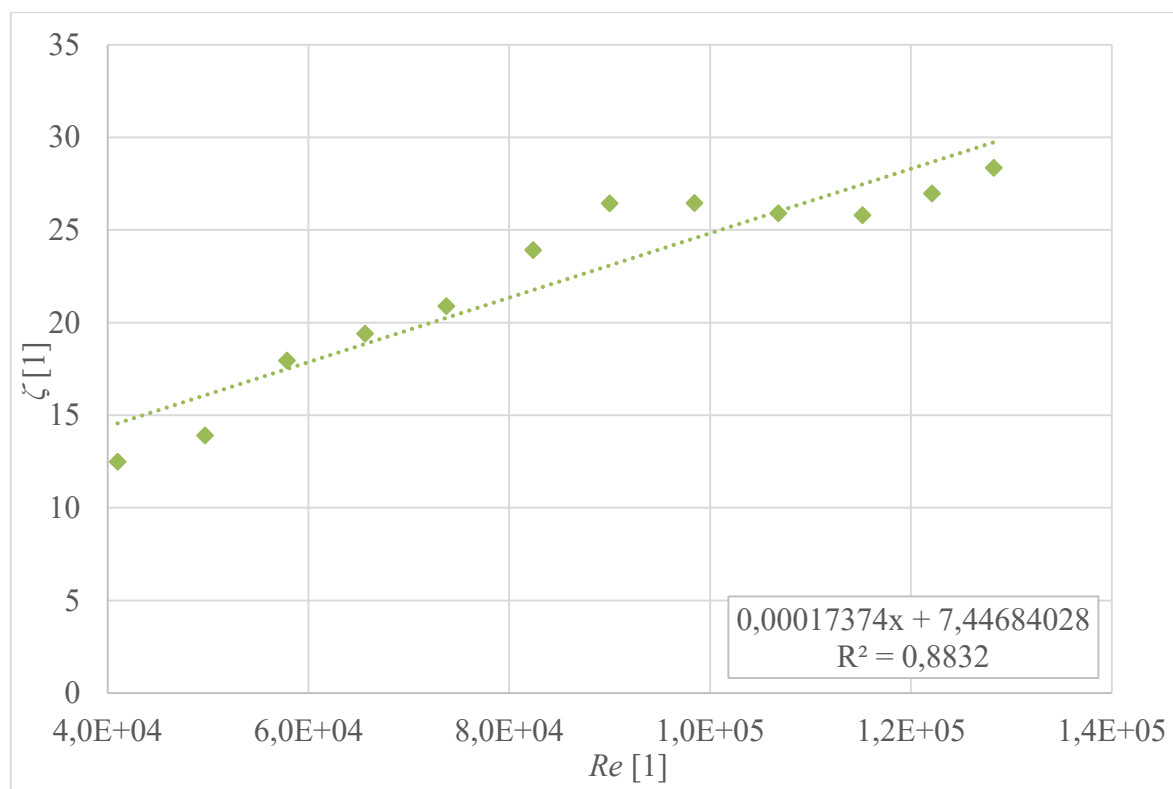


Obrázek 31 - Vzorek sítka S3

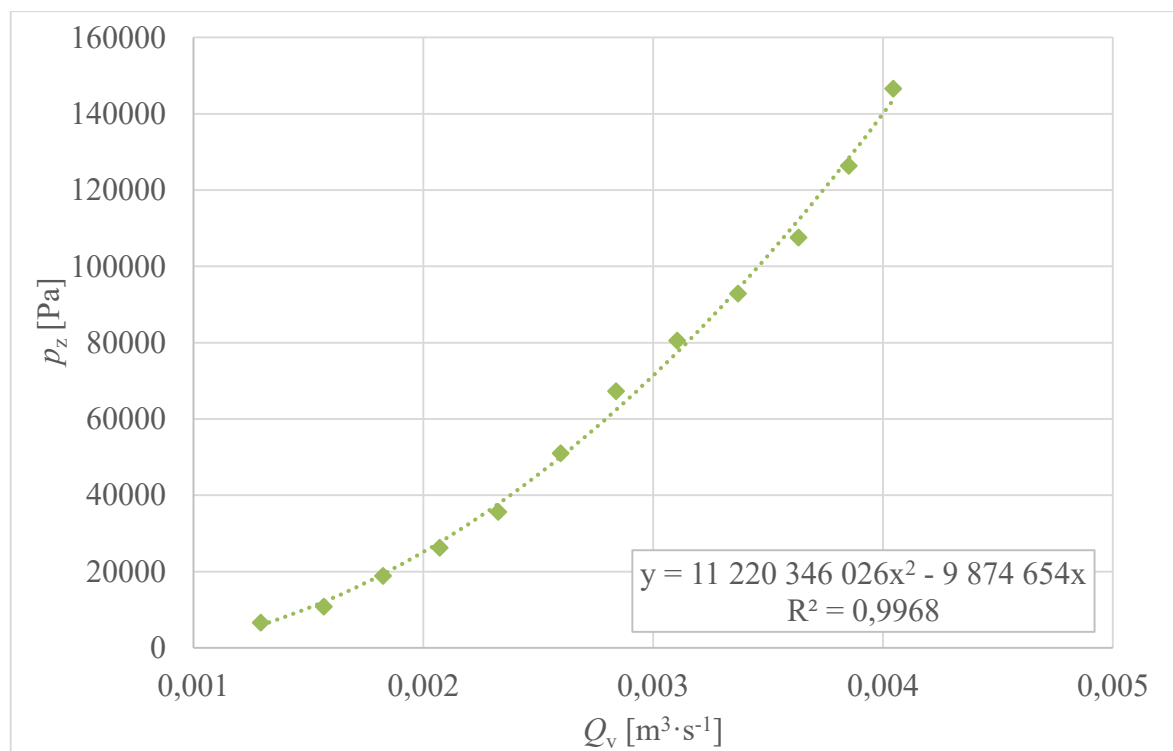
Přepočtené hodnoty jsou zapsány do tabulky 13. Přepočty byly provedeny dle výše zmíněných vztahů. Výsledné závislosti jsou zaneseny do dvou grafů. Graf na obr. 32 vyjadřuje závislost Reynoldsova čísla Re na součiniteli místních ztrát ζ . Následující graf (obr. 33) vyjadřující závislost průtoku kapaliny Q_v na tlakové ztrátě p_z způsobenou filtračním vzorkem sítka S3.

Tabulka 13 - Přepočtené hodnoty sítka S3

Q_v [m ³ ·s ⁻¹]	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	p_z [Pa]	v [m·s ⁻¹]	ζ [1]	Re [1]
0,001293	11000	4400	6600	1,03	12,492	40995
0,001567	18200	7400	10800	1,25	13,915	49687
0,001825	29400	10500	18900	1,45	17,958	57860
0,002071	40600	14300	26300	1,65	19,408	65654
0,002326	54000	18300	35700	1,85	20,890	73730
0,002598	70500	19500	51000	2,07	23,911	82369
0,002839	89500	22200	67300	2,26	26,432	89996
0,003105	108000	27400	80600	2,47	26,461	98433
0,003369	127100	34200	92900	2,68	25,904	106808
0,003633	148910	41300	107610	2,89	25,804	115174
0,003851	175800	49400	126400	3,06	26,967	122105
0,004045	203000	56400	146600	3,22	28,354	128243



Obrázek 32 - Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovu čísla na vzorku sítka S3



Obrázek 33 - Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro sítko S3

Grafické zobrazení hodnot Reynoldsových čísel bylo vyhodnoceno od 90000 do 160000 Re a průtoky byly vyhodnocovány z důvodu přehlednosti dat od 0,0025 do 0,0050 $m^3 \cdot s^{-1}$.

6.5 Vyhodnocení dat sítka S4

Dodané filtrační sítko S4 mělo nejmenší otvory mezi dráty. Podle vzhledu se jedná téměř o tkaninu, tudíž na měřeném vzorku vznikala největší tlaková ztráta p_z způsobenou neprůchodností vody skrz vzorek. Navzdory zvyšování nastavení frekvenčního měniče na co nejvyšší otáčky, nebylo možné dosáhnout potřebného průtoku, který by zaručil spolehlivé měření tlakové místní ztráty na vzorku. Navýšení otáček nebylo možné z důvodu vytvoření kavitace v sání čerpadla, která by měla za následek zvýšené opotřebení lopatkového kola odstředivého čerpadla. Vzorek filtračního sítka lze vidět na obr. 34.

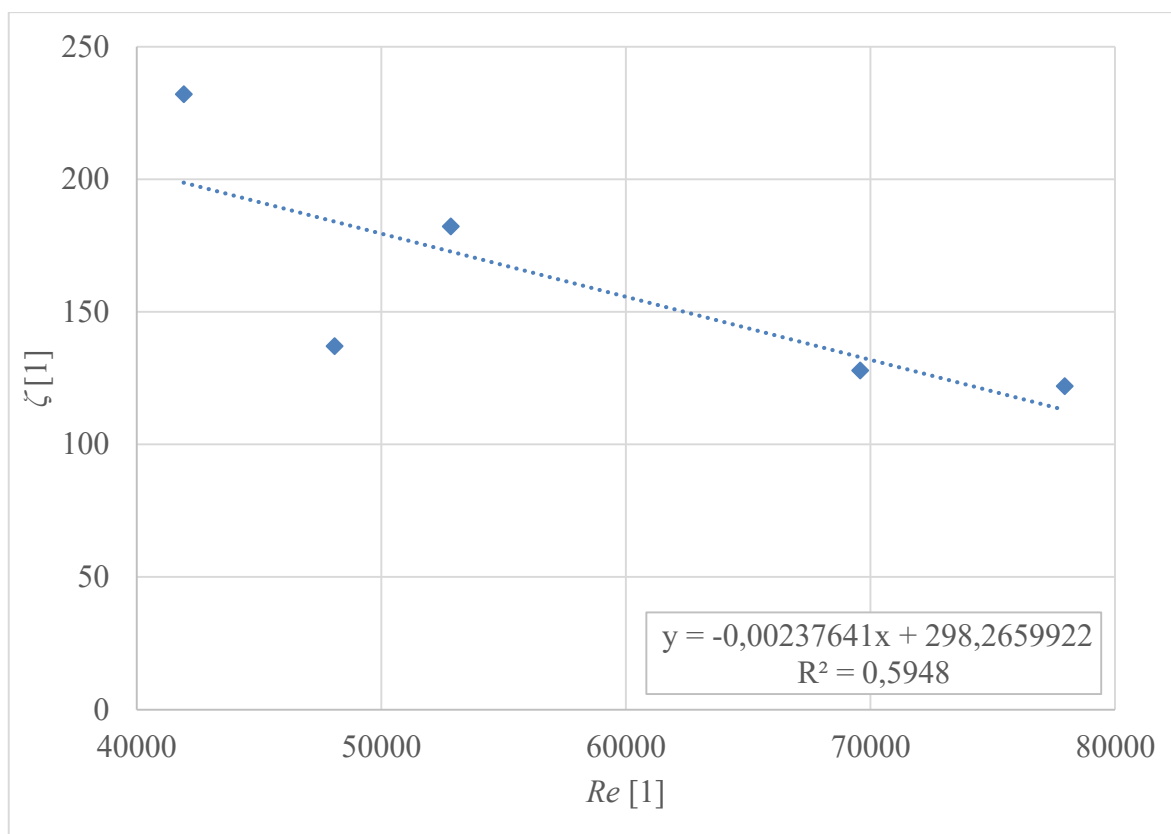


Obrázek 34 - Vzorek sítka S4

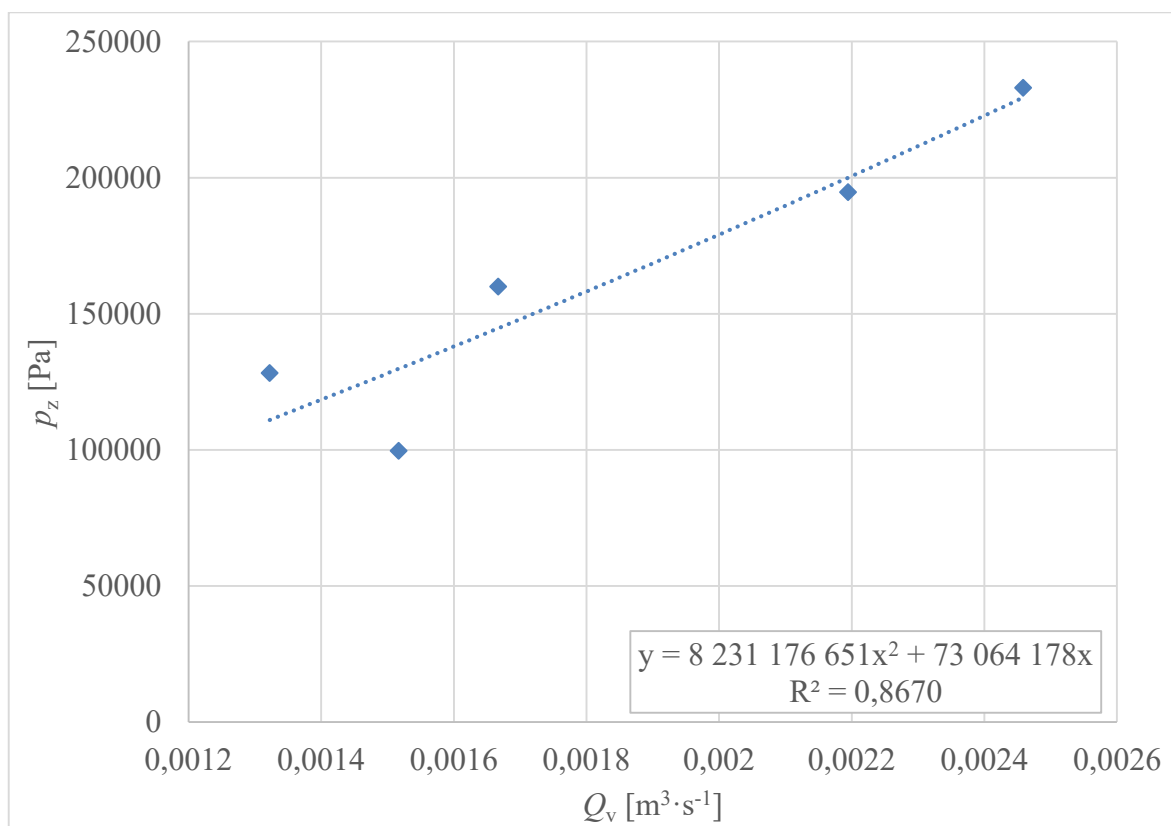
Přepočtené hodnoty jsou zapsány do tabulky 14. Přepočty byly provedeny dle výše zmíněných vztahů. Výsledné závislosti jsou zaneseny do dvou grafů. Graf na obr. 35 vyjadřuje závislost Reynoldsova čísla Re na součiniteli místních ztrát ζ . Následující graf (obr. 36) vyjadřuje závislost průtoku kapaliny Q_v na tlakové ztrátě p_z způsobenou filtračním vzorkem sítka S3.

Tabulka 14 - Přepočtené hodnoty sítka S4

Q_v [m ³ ·s ⁻¹]	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	p_z [Pa]	v [m·s ⁻¹]	ζ [1]	Re [1]
0,001517	100300	700	99600	1,21	137,025	48085
0,001322	128900	700	128200	1,05	232,059	41920
0,001667	160700	700	160000	1,33	182,281	52840
0,002194	195400	700	194700	1,75	127,949	69573
0,002458	233700	700	233000	1,96	122,009	77939



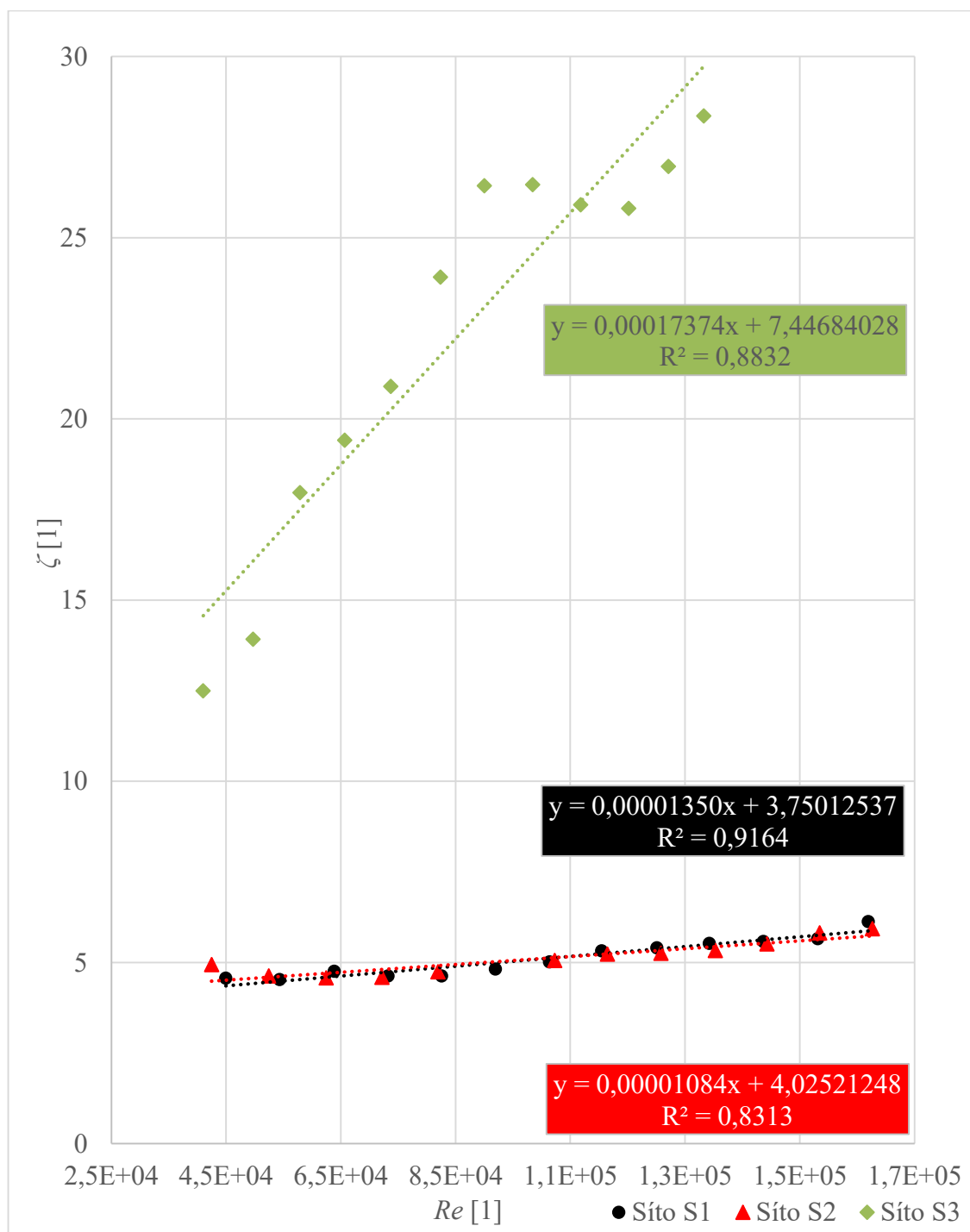
Obrázek 35 - Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovu čísla na vzorku sítka S4



Obrázek 36 - Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro sítka S4

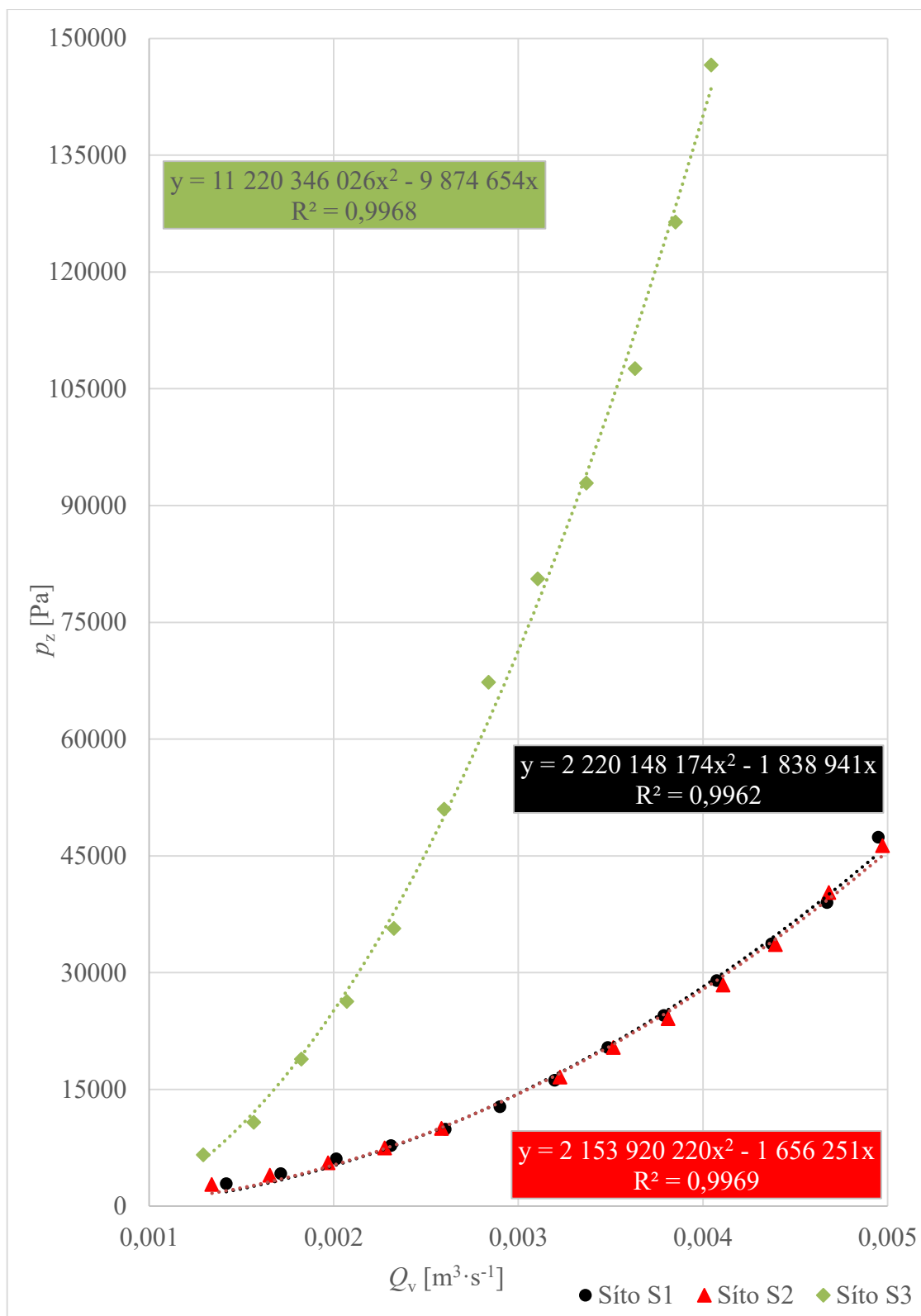
6.6 Porovnání síték

Porovnávání naměřených charakteristik vzorků filtračních síték má význam pouze u prvních třech síték. Sítko S4 nemá význam porovnávat graficky porovnávat s ostatními vzorky síték z důvodu mnohonásobně (8 až 12 krát) větším místním odporům oproti sítku S3, tudíž není vhodné porovnávat součinitele místních ztrát ζ a tlakovou ztrátu p_z na vzorcích filtračního sítky, protože by ostatní porovnávaná data zanikla.



Obrázek 37 - Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovu čísla na vzorcích síték S1, S2 a S3

Závislosti filtračních sítěk Reynoldsova čísla Re na součiniteli místních ztrát ζ vzorků S1, S2 a S3 lze vidět na obr. 37. Z jednotlivých průběhů se dá vyčíst, že vzorek sítko S1 a S2 mají téměř totožné závislosti Reynoldsova čísla Re na součiniteli místních ztrát ζ . Porovnání závislostí průtoku Q_v na tlakové ztrátě p_z lze pozorovat na obr. 38.



Obrázek 38 - Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku na vzorcích sítěk S1, S2 a S3

Na vzorcích síték S1 a S2 se tlakové ztráty p_z pohybovali přibližně v rozmezí 3000Pa až 46000Pa v závislosti na průtoku Q_v přibližně od $1 \cdot 10^{-3}$ do $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vzorek S3 vytvářel tlakovou ztrátu v rozmezí od 4000Pa až 146000Pa při průtocích $1 \cdot 10^{-3}$ do $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vzorek filtračního sítka S4 není možné při shodných parametrech vodní tratě plně vyhodnotit, tudíž můžeme tvrdit, že už při velice nízkých průtocích vytváří 8 až 12 krát větší místní ztrátu.

7 Závěr

Bakalářská práce se věnuje měření tlakové ztráty a určení odporového součinitele sítko filtru. Tyto vzorky sítok byly dodány firmou ARMATURY Group a.s. Z těchto sítok se následně vyrábějí filtrační vložky do filtrů. Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na hydraulické odpory v potrubí. Jedná se o třetí ztráty v potrubí při laminárním a turbulentním proudění v potrubí. Bakalářská práce zahrnuje teoretickou část z oblasti místních hydraulických ztrát. Pro zkoumání místních odporů bylo potřeba zjistit tlakovou diferenci a zároveň rychlosti proudění tekutiny, proto jsou v bakalářské práci popsány metody a použita zařízení při měření.

Pro zrealizování měření bylo nutné vybrat, případně upravit vodní trať. Úprava první navrhované vodní trati v laboratoři E306 by vyžadovala další finanční prostředky, a proto byla využita vodní trať v laboratoři N108, která splňovala veškeré potřebné podmínky pro měření. Obě vodní trati byly popsány a parametry komponent obvodu zapsány do tabulek. Vzorky sítok byly nafoceny digitálním mikroskopem Keyence VHX-5000, jak pro získání větších detailů vzorků, tak i pro změření průměru drátu a velikosti mezer mezi jednotlivými dráty. Dále v praktické části bakalářské práce je popsán postup měření místní ztráty na vzorcích sítko. Pro měření rychlosti proudění byl použit indukční průtokoměr FLONET FN20XX.1 a pro změření tlakové difference dvojice snímačů HySense PR 310 připojené na A/D převodník Hydrotechnik 5050. Veškerá naměřená data jsou zanesena do tabulek.

Dále byly změřené hodnoty použity pro vyhodnocení místních ztrát, které byly graficky vyjádřeny součinitelem ζ v závislosti na Reynoldsově čísle Re a tlakovou ztrátou p_z v závislosti na průtoku Q_v . Charakteristiky jednotlivých sítok kromě nejjemnějšího sítko S4 byly graficky porovnány. Nejjemnější vzorek sítko S4 nebylo možno při stejných parametrech vodní trati kvalitně změřit, protože nepropouštělo dostatečné množství vody. Z důvodu mnohonásobně (8 až 12 krát) větším místním odporům oproti sítku S3 a nepříteli spolehlivých hodnot tudíž nebylo do porovnání zahrnuto. I když mají vzorky sítok S1 a S2 rozdílné parametry, jejich projev místního odporu v potrubí byl srovnatelný. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že sítko S1 má větší otvory mezi dráty než S2, ale zároveň má i podstatně větší průměr drátů, proto je pravděpodobně charakter ztrát srovnatelný. Podle očekávání dopadl projev místního odporu v potrubí u filtračního sítko S3, kde je charakter znatelně strmější a hodnoty místní ztrát jsou větší.

Seznam použité literatury

- [1] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin*, Ediční středisko VŠB – TUO, Ostrava 2007, 257 s., ISBN 978-80-248-1508-4, [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [2] DRÁBKOVÁ, S., KOZUBKOVÁ, M. *Cvičení z mechaniky tekutin*, Ostrava 2004, 145 s., [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Hydro_2012.pdf
- [3] ŠKORPÍK, Jiří. *Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny*, Brno 2010-12, ISSN 1804-8293, [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/38.html>.
- [4] RAUTOVÁ, J. *Měření charakteristik paralelně a sériově řazených potrubí*, VŠB-TU Ostrava, 2010, 9 s., [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Rautova-Mereni_charakteristik.pdf
- [5] KOZUBKOVÁ, M. *Mechanika tekutin*, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007, 113 s., [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/navod.pdf>
- [6] WILO, *TOP-S 30/10*, [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://productfinder.wilo.com/ba/en/c000000090002c94500020023/_000000090002874b0001003a/product.html#tab=product_salesdata
- [7] ELIS PLZEŇ a. s., *Indukční průtokoměr FLONET FN 20XX.1*, [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: www.elis.cz/cs/doc_download/20-flonet-fn-20xx-cze-m
- [8] BHV senzory, *Diferenční tlakové snímače*, [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/bhv/doc1/bhv5355.pdf>
- [9] YASKAWA, *V1000 Drive 1/8 - 25 HP*, [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.yaskawa.com/products/drives/industrial-ac-drives/microdrives/v1000-drive>
- [10] WILO, *Helix VE 1605-1*, [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: http://productfinder.wilo.com/ie/en/c0000002b0000f40800010023/_000000130000960d0002003a/product.html#tab=product_pumpcurve

- [11] HYDROTECHNIK GmbH, *HySense PR 310*, [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.hydrotechnik.com/fileadmin/user_upload/Technische_Datenblaetter_Techn_Infos/Sensoren_HySense_PR_310_TEI_ENG.pdf
- [12] FORMÁNEK, J. *Podklady k principu měření tlaku*, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2007, [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/10-F.pdf>
- [13] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*, VŠB-TU Ostrava, Ostrava 1995, 129 s., [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Janalik-Mereni_tek_mech.pdf
- [14] ČMELÍK, M. *Fyzikální tabulky*, Liberec: Technická univerzita, Liberec 2001, 58 s., ISBN 80-7083-515-X.